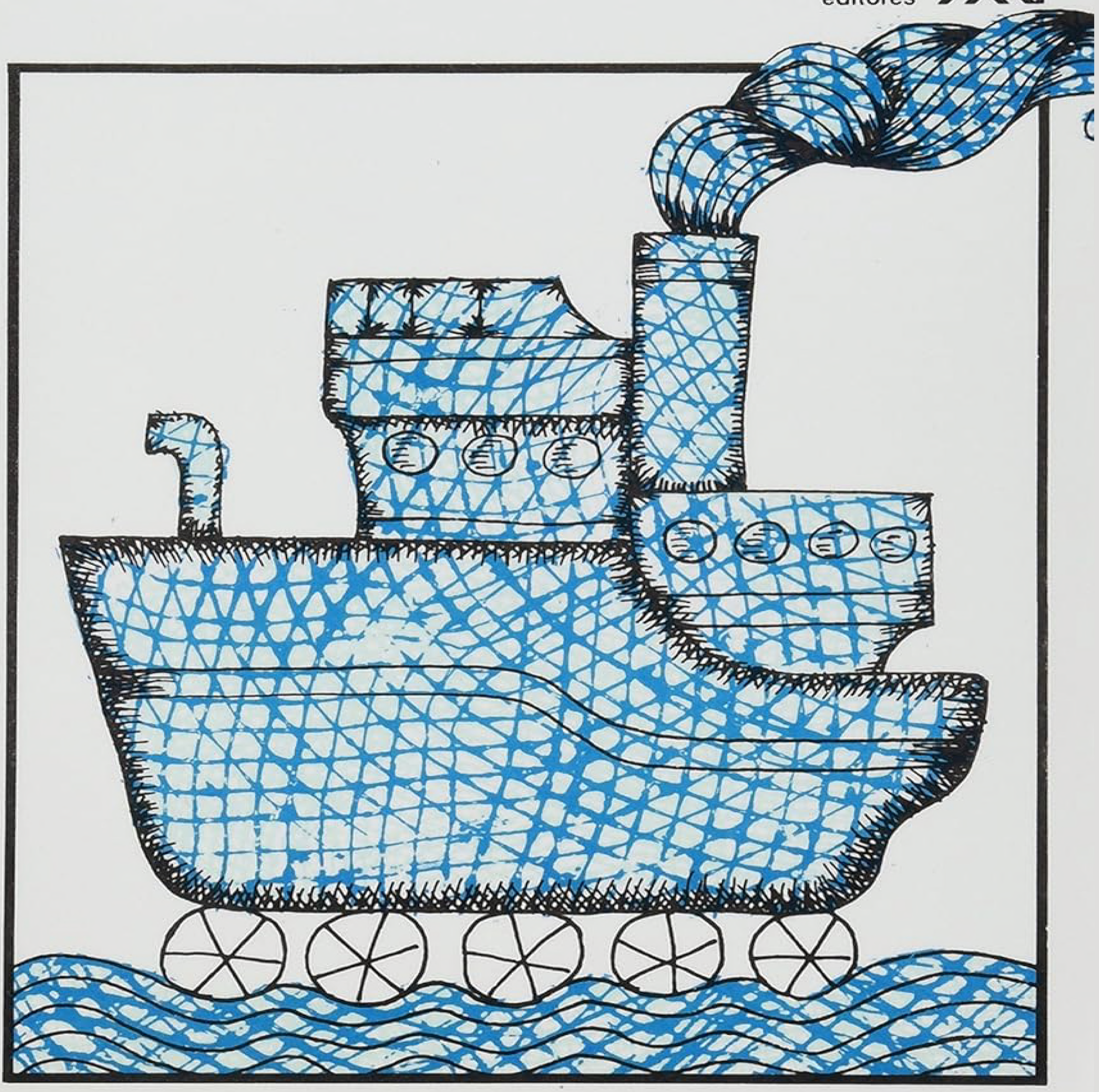
t.k. derry
trevor williams

HISTORIA DE LA TECNOLOGÍA

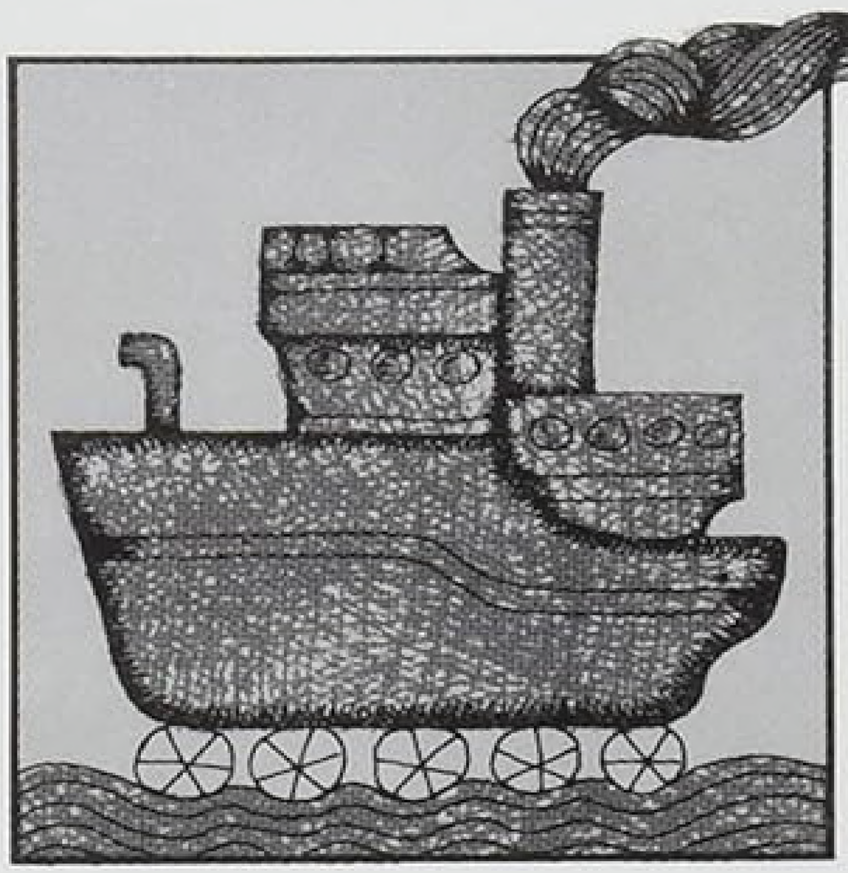
desde 1750 hasta 1900 (I)

siglo veintiuno editores



La importancia de los factores tecnológicos en el desarrollo de la sociedad no ha recibido suficiente atención historiográfica, en contraste con la importancia concedida tradicionalmente a la historia política y constitucional o, modernamente, a la historia social y económica. Por ello esta obra resulta singular, tanto en su propósito como en su planteamiento. Concebida inicialmente como una versión abreviada de una extensa *Historia de la tecnología* publicada por Clarendon Press (Oxford), su planteamiento varía sustancialmente respecto a aquélla. Se ha intentado que la historia del desarrollo tecnológico aparezca estrechamente relacionada, en cada época, con su perspectiva histórica general. Cronológicamente el texto está dividido en tres partes: la primera (vol. 1) abarca hasta 1750 —comienzo de la revolución industrial en Inglaterra—, la segunda (vols. 2 y 3) continúa la exposición hasta 1900 y la tercera (vols. 4 y 5) continúa la exposición hasta 1950. La decisión de detenerse en esta fecha se explica por la falta de perspectiva histórica sobre la repercusión de desarrollos tecnológicos posteriores, así como por la complejidad técnica de éstos.

El propósito de la obra es ofrecer una visión sintética del desarrollo de las ramas de la tecnología que han cambiado el curso de la historia, sin omitir por ello los oficios elementales de menor repercusión social. Se ha pretendido que el resultado fuera aceptable tanto para el historiador y el tecnólogo como para el lector común.



siglo veintiuno editores

ISBN 968-23-1602-2

HISTORIA DE LA TECNOLOGIA

Siglo veintiuno

Volumen 2

DESDE 1750 HASTA 1900 (I)

por

T. K. DERRY
y TREVOR I. WILLIAMS

México
España
Argentina
Colombia

historia de la tecnología

Siglo XXI

TRADUCTORES

Carlos Caranci
José Palao Taboada
Mari-Carmen Ruiz de Elvira e Hidalgo
Juan Alfonso Ruiz de Elvira y Prieto
Magdalena Ruiz de Elvira y Zubizarreta
Mari-Carmen Ruiz de Elvira y Zubizarreta
Carmen Sáez Díaz

DISEÑO DE LA CUBIERTA

Santiago Monforte

Año : 1977
Editorial : Siglo XXI
ISBN : 96823160 22
ISBN13 : 9789682316029
Licencia : Creative Commons

NOTA EDITORIAL

El lector encontrará al final del tercer volumen unos cuadros cronológicos, una bibliografía escogida, el origen de las ilustraciones seleccionadas, un índice temático y un índice de nombres, correspondientes a los tres primeros volúmenes de esta colección.

Indice

SEGUNDA PARTE

LA REVOLUCION INDUSTRIAL HASTA 1900 (I)

10. PANORAMA HISTORIGO GENERAL, 1750-1900 397

Introducción general, 397.—El período de aceleración industrial (1750-1792), 405.—El período de las guerras napoleónicas (1792-1815), 415.—De Waterloo a la Gran Exposición (1815-1851), 423.—El período de luchas nacionalistas (1851-1871), 432.—La época del materialismo (1871-1900), 440.

11. LA MAQUINA DE VAPOR 449

Introducción, 449.—Iniciadores de la máquina de vapor, 451.—Watt y Trevithick, 463.—La máquina de vapor aplicada al transporte, 473.—Locomotoras y máquinas de vapor fijas, 481.—Desarrollo posterior de la máquina de vapor, 487.—Las turbinas de vapor, 490.—Los fundamentos teóricos, 494.

12. LA MAQUINA-HERRAMIENTA Y SUS PRODUCTOS. 498

Introducción, 498.—El avance del trabajo de precisión, 504.—La herencia de los iniciadores, 509.—El «sistema americano», 518.—Evolución posterior (1850-1900), 520.

13. EL TRANSPORTE MODERNO 529

La última época de la navegación a vela, 530.—La época de los buques de vapor construidos con hierro y acero, 537.—El desarrollo de los ferrocarriles, 548.—El locomóvil de vapor para carretera y la bicicleta, 563.—Los automóviles primitivos, 571.—Iniciación de la conquista del aire, 576.

14. LA CONSTRUCCION: LAS NECESIDADES DE LAS COMUNIDADES URBANAS 586

El ingeniero civil, 586.—Los materiales de construcción, 588.—Los muebles, 598.—Nuevos usos del hierro forjado, del acero y del hormigón, 601.—Mejoras del abastecimiento de aguas, 609.—Desagüe y saneamiento, 619.

15. LA CONSTRUCCION: LAS EXIGENCIAS DEL TRANSPORTE 625

La construcción de carreteras, 625.—Los ferrocarriles: el tendido de vías, 650.—Los puentes, 653.—Los túneles, 666.—Obras terrestres para facilitar el tráfico marítimo, 673.

16. EL CARBON Y LOS METALES 680

La minería del carbón, 680.—Hierro colado y forjado, 691.—La llegada del acero barato, 700.—Explotación de metales no férreos (1750-1900), 709.—Nuevos productos metálicos, 722.—Armamento, 727.

17. NUEVOS MATERIALES: GAS DE HULLA, PETROLEO Y CAUCHO 736

Orígenes del alumbrado por gas, 736.—La era del gas, 743.—La primitiva explotación de yacimientos bituminosos, 749.—La industria petrolífera, 755.—La primitiva manufactura del caucho, 762.—La vulcanización y la ampliación de los usos del caucho, 769.—La plantación de caucho, 772.

SEGUNDA PARTE

LA REVOLUCION INDUSTRIAL HASTA 1900

10. PANORAMA HISTORICO GENERAL, 1750-1900

INTRODUCCION GENERAL

Siempre ha existido una estrecha relación de fondo entre la historia general del hombre y su progreso tecnológico. El Imperio romano, por ejemplo, se basó en los hallazgos de sus ingenieros, incluyendo a los grandes constructores de vías, tanto por lo menos como lo hizo sobre los más abstractos conceptos de ley y deber. La expansión de Europa en el siglo XVI dependió de la existencia de nuevos medios para cruzar los océanos tanto como de la voluntad de hacerlo. En el mismo sentido, los cambios políticos, asombrosamente rápidos y numerosos, del siglo y medio al que dedicaremos el resto del libro influyen en cada caso en la revolución tecnológica, que es el objeto de nuestro estudio y a su vez son influidos por ella.

El hombre occidental de 1900 volvía la mirada con complacencia hacia una época de revolución industrial y política. Observando la primera, tenía pleno derecho a afirmar que su relación con los recursos naturales había cambiado profundamente, y para bien. Podía estar seguro, asimismo, del gran progreso político logrado, así como de que se iba a avanzar aún más. Hoy día, en realidad, los avances técnicos conseguidos antes de 1900 parecen, en comparación, algo menos impresionantes de lo que fueron en realidad; el progreso político, por otro lado, que hizo que un mundo como el de 1900 pareciese mucho más aceptable que el de 1750, es hoy añorado con cierta envidia por más de un individuo reflexivo. Quizá la creencia de que los más importantes problemas de la política estaban siendo resueltos al mismo tiempo que los más graves problemas de la economía fue, incluso en 1900, una ilusión engañosa, sustentada y propagada sobre todo por las clases poseedoras; sin

embargo, para nuestros fines, es importante tener presente que la revolución industrial, considerada con demasiada frecuencia en un contexto limitado al estrecho campo de la historia británica, fue afectando de modo creciente a la política del mundo occidental en su totalidad, y fue afectada a su vez por aquélla, y hacia 1900 compartía con los cambios políticos el crédito, por lo que se consideraba habitualmente en ambos aspectos como una época de progreso sin igual.

La unidad del período es artificial, pues los grandes cambios industriales habían comenzado ya, como vimos, bastante antes de 1750 (p. 65); y continúan todavía, como todos sabemos, para bien o para mal, mucho después de 1900. Asimismo, es igualmente artificial, aunque muy conveniente, tratar de llevar a cabo ulteriores subdivisiones de este siglo y medio en el que los acontecimientos, tanto en el campo político como en el tecnológico, se siguen unos a otros en una apretada y complicada secuencia de causa y efecto. Con todo, podemos distinguir tres fases principales.

La primera de éstas llega hasta la batalla de Waterloo, en 1815, y está marcada por tres grandes guerras y dos revoluciones trascendentales. De este período, que abarca dos generaciones, y comprende lo que se ha convenido en llamar revolución industrial en sentido estricto —la expansión de la industria británica en tiempos de Arkwright, Wedgwood, Boulton y Watt—, el equivalente en años a una generación entera corresponde a un período de guerras: la consiguiente alteración de la economía tuvo importantes efectos sobre la tecnología, si bien tales guerras no fueron totales y sus consecuencias materiales fueron leves para una mentalidad del siglo XX. Al mismo tiempo, las nuevas ideologías revolucionarias, encarnadas en la Declaración de Independencia americana (1776) y en la Declaración francesa de los Derechos del Hombre (1789) tuvieron enorme influencia sobre la actitud de los hombres hacia el mundo en general

y hacia el prójimo en particular: a la larga, la valoración de los medios para ahorrar fuerza de trabajo se halla estrechamente relacionada con el valor asignado al trabajador.

El período posterior a 1815 comienza con una engañosa etapa de calma, la tranquilidad política de la era de Metternich y la lenta recuperación económica de Europa tras los largos años de destrucciones de las guerras napoleónicas, hechos que repercutirían a su debido tiempo sobre la industria británica. Luego, a partir de los años cuarenta del siglo XIX, las fuerzas paralelas, pero con frecuencia opuestas, del nacionalismo y del liberalismo recobraron fuerza. Por un lado se produjo el triunfo del Norte en la guerra civil norteamericana, y la unificación de Italia sobre bases parlamentarias; por el otro, la instauración del Imperio alemán por la nación en armas, que se debió más al militarismo que al liberalismo. En cada caso, de todos modos, el crecimiento de un fuerte Estado nacional fue acompañado por la ampliación de la red ferroviaria, que fue el más importante de los avances tecnológicos promovidos por Gran Bretaña en esta segunda fase.

De 1871 a 1900 los países occidentales se mantuvieron de nuevo en calma, en el sentido de que sus energías fueron desviadas de los conflictos sangrientos hacia la explotación de los territorios nacionales. Para Estados Unidos y Canadá, así como también para Rusia, fue la época de la «frontera móvil»; para los países de Europa occidental, con territorios más reducidos, fue la época del imperialismo y del reparto de Africa. Un historiador estadounidense, el profesor Carlton Hayes, la denomina «la generación del materialismo». Es cierto que una civilización materialista, basada en los enormes avances de la tecnología occidental, se difundió durante estos treinta años por toda la superficie del globo con una rapidez nunca vista. Puesto que los avances tecnológicos proporcionaban un nivel de vida más alto a muchos, quizá a la mayoría de las ingentes multi-

tudes de seres humanos afectados por ellos, otros, además de los materialistas, llegaron al convencimiento de que su persistencia permitiría no sólo poder, sino querer terminar con lo que Winwood Reade llamó una vez «el suplicio del hombre».

La historia general de estos grandes progresos no sólo comienza en Gran Bretaña, sino que, por lo menos durante cien años, tanto los británicos como sus máquinas se hallaron también a la cabeza de la gradual expansión del «taller del mundo» a otros países: a través del canal de la Mancha hacia Francia y especialmente hacia Bélgica, a algunos de los muchos Estados alemanes y a sus vecinos, tales como Suecia y Suiza, y hacia el este de Estados Unidos. Pero en la segunda mitad del siglo XIX la tendencia general fue cambiando lentamente, a medida que la importancia económica de Gran Bretaña venía a depender cada vez más de los efectos acumulativos de su pasada inventiva, en tanto que Estados Unidos, Alemania y otras naciones, cuyo recuerdo del pasado no les daba la misma seguridad psicológica, tan peligrosa, ni debían enfrentarse a las dificultades de hecho que en cambio habían encontrado los británicos, iban colocándose paulatinamente a la cabeza. Hacia 1900, la mayoría de los hallazgos tecnológicos más recientes no eran de origen británico, y lo que es aún mucho más importante, estaban siendo desarrollados de manera mucho más enérgica en los países que no poseían grandes capitales invertidos en sistemas de producción cuya eficacia ya era algò repetidamente comprobado. La energía eléctrica y el motor de combustión interna, por ejemplo, estaban haciendo rápidos progresos en otros lugares, mientras que Gran Bretaña, con su soberbio equipo industrial basado en la fuerza de vapor, aprendía lentamente que lo bueno es enemigo de lo mejor.

Antes de volver hacia el comienzo de la revolución industrial en Gran Bretaña puede sernos útil destacar media docena de influjos que, en diferentes grados, repercutieron en el desarrollo de la revolución

industrial en la mayoría de los países y épocas históricas. En primer lugar se hallaba el sorprendente crecimiento de la población. Es cierto que la mejora de las técnicas agrícolas permitió aumentar la disponibilidad de alimentos, y asimismo que un mayor grado de higiene, asociado a la introducción del algodón en la confección y a la de tuberías baratas para el suministro de agua y para el drenaje, ayudó en gran medida a la labor llevada a cabo por el avance de la ciencia médica para mantener con vida el mayor número posible de personas durante el mayor tiempo posible; con todo, el rápido crecimiento de la población europea, en conjunto, no tiene relación directa con la difusión de la revolución industrial. Una estimación razonable sugiere que la población, de unos 140 millones en 1750, aumentó en 1800 a 188 millones; en 1850, a 266, y en 1900, a 401, lo que da unos porcentajes de aumento de un 36, un 40 y un 50 por ciento, respectivamente, lo que no corresponde a los cambios industriales: la influencia de éstos fue poca antes de 1800, para hacerse extraordinaria sólo después de 1850. Aun así, y cualesquiera que sean sus causas últimas, tal aumento de población proporcionó por lo menos tres estímulos al desarrollo industrial. Para suministrar aunque sólo fuese un mínimo de alimentos, el granjero hubo de aumentar su eficacia industrial, y se desarrollaron además medios de transporte especializados, con el fin de importarlos de centros de aprovisionamiento remotos, e incluso transoceánicos. A la larga, asimismo, las bocas hambrientas podrían ser alimentadas tan sólo si sus manos eran empleadas en la fabricación de manufacturas, las cuales, a su vez, y como resultado de los progresos tecnológicos, pudieron ser intercambiadas en otros lugares del globo por remesas adecuadas tanto de materias primas como de alimentos. En tercer lugar, el crecimiento de la población fue un aliciente para el incremento de formas urbanas de vida, y la mayoría de los progresos técnicos, desde la fábrica que utilizaba fuerza de vapor

e iluminación de gas, en un primer momento del período que estudiamos, hasta el rascacielos de estructura de acero y los espectáculos cinematográficos, más tarde, se difundieron mucho más rápidamente en un medio urbano.

Los factores políticos son más fáciles de localizar. El alto nivel de libertad personal y política que caracterizó a la vida británica en el siglo XVIII se acepta generalmente como uno de los factores que ayudaron a los inventores. Las revoluciones norteamericana y francesa tuvieron un efecto muy semejante, al liberar tanto las energías de los individuos como a las empresas comerciales de sus restricciones tradicionales, tales como las barreras aduaneras internas y las reglamentaciones comerciales. La importancia de la libertad estadounidense aumentó a medida que el país iba llenándose de emigrantes europeos. Para la misma Europa, la difusión de las ideas francesas siguiendo las huellas de los ejércitos napoleónicos, la rápida divulgación de los principios de libertad durante las revoluciones de 1848, la desaparición, al fin, de la servidumbre en Rusia y Polonia gracias al decreto de emancipación de Alejandro II en 1861 y la difusión del sufragio masculino desde Francia y Alemania a otros Estados menores de las últimas décadas del siglo XIX, son tan sólo algunas de las principales etapas durante las que se produjo efectivamente un proceso acumulativo. Pero al mencionar a Napoleón recordamos que la época de creciente libertad personal se caracteriza de manera aún más intermitente por conflictos internacionales. La guerra ha dado siempre gran impulso al progreso tecnológico, hecho del que hay numerosos ejemplos en la revolución industrial británica, desde las carronadas, que se llevaron a cabo en las primeras factorías modernas escocesas (Carron) para emplearlas contra los rebeldes norteamericanos, al acero Bessemer, que se inventó al producirse la demanda de materiales más perfeccionados con destino al ejército, en tiempos de la guerra de Crimea. De este

modo también la Europa continental realizó un gran estímulo por la necesidad de paliar los efectos del bloqueo naval británico en los primeros años del siglo XIX, en tanto que la guerra civil de 1861-1865 demostró ser uno de los lustros básicos en el desarrollo de la industria estadounidense.

Existen otros factores comunes al desarrollo técnico de Gran Bretaña y al del resto del mundo occidental, que incluyen la acumulación de capitales y su disponibilidad internacional, así como el impulso dado por el incremento del comercio internacional. Entre 1750 y 1900 Gran Bretaña figura como el principal país prestamista, si bien a comienzos del período una parte considerable de la deuda nacional británica estaba localizada aún en el extranjero, sobre todo en Amsterdam, mientras que hacia fines del período Estados Unidos, Alemania y Francia desempeñaban, todos ellos, un importante papel en la impulsión de la revolución industrial por medio de préstamos concedidos tanto a países independientes, como Rusia, como a regiones de explotación colonial manifiesta o velada. En cuanto al comercio mundial, se ha calculado que en un período en que la totalidad de la población se duplicó, el comercio creció diez veces más, debido, en especial, a los progresos en los transportes y en las comunicaciones. Y las potencias tecnológicamente avanzadas estuvieron siempre interesadas en desarrollarlos en las regiones más atrasadas del mundo, si bien su meta era asegurar el suministro de materias primas y de productos alimenticios; pero el resultado fue, a largo plazo, provocar una revolución industrial por imitación.

Otro factor importante para el desarrollo de la tecnología moderna ha sido el sistema de leyes sobre patentes en los diferentes países. El sistema legal inglés (p. 58), extendido a Escocia al llevarse a cabo la unión de 1707, proveyó las bases de la legislación estadounidense sobre propiedad industrial, promulgada en 1790 y administrada por primera vez por Jef-

ferson como secretario de Estado. En 1836 se instaló en Estados Unidos una oficina de patentes, con el fin de proporcionar medios autorizados para sancionar la utilidad y novedad de cada demanda, y en 1861 el tradicional plazo de concesión inglés de 14 años se extendió a 17. Fue de este sistema del que Lincoln dijo que «añade el petróleo del interés al fuego del genio»; hacia 1857 los Estados Unidos habían emitido un 35 por ciento más de patentes que Gran Bretaña.

Las leyes francesas sobre patentes datan de 1791, cuando los revolucionarios, tras deshacerse de la Corona y los privilegios gremiales como parte del Antiguo Régimen, afirmaron el principio de que «Se considerarán atacados los derechos del hombre si un descubrimiento industrial no se considera como propiedad de su descubridor». Uno de los primeros en obtener la patente fue Leblanc (p. 777), si bien ésta no protegió su fábrica de una posterior confiscación. Sin embargo, el principio del derecho a la propiedad industrial fue claramente enunciado en Francia, de donde se extendió a algunos países vecinos, siendo así que en Alemania las patentes no alcanzaron una validez general hasta la reunión de los Estados miembros del *Zollverein* (o unión aduanera) en 1842, y la protección no se completó hasta 1877; hacia 1857 Estados Unidos concedió sesenta veces más patentes que Prusia.

En 1883 una convención internacional exhortaba a la práctica de patentar los inventos en varios países, concediendo al inventor un año de favor, durante el cual era protegido contra la piratería en todos los países firmantes. Se estimuló la inventiva, puesto que el monopolio por un período limitado, que daba al inventor el incentivo de hacer público su descubrimiento, se extendió a un área menos limitada. Pero al mismo tiempo la creciente complejidad de los procesos industriales dio lugar a que la elaboración de las patentes y la comprobación de su validez con arreglo a unos principios legales básicos,

que con frecuencia diferían profundamente de un Estado a otro, comenzase a complicarse cada vez más. Esto estimuló a las grandes empresas que tenían intereses en varias partes del mundo, las cuales, hacia 1900, usaban frecuentemente de los pleitos por una patente, o la amenaza de los mismos, como arma adecuada para suprimir el desarrollo de nuevos procedimientos no deseados.

Otro rasgo común a la revolución industrial de los diferentes países es la significación cada vez mayor del crecimiento de las teorías científicas y matemáticas. En general, podemos decir que a lo largo del siglo XIX se va haciendo evidente el papel del científico como adelantado de los cambios industriales en los principales países afectados, si bien en 1900 todavía es raro que tenga el carácter fundamental que asociamos actualmente con la investigación científica. Por lo general, período durante el cual la industria británica dirigía el mundo coincide con aquel en el que lo empírico era preferido al acercamiento puramente científico a los problemas industriales: sin duda, este liderazgo se hallaba ya en decadencia antes de que la doctrina que Ludwig Mond, un alemán naturalizado inglés, expuso ante la Sociedad de la Industria Química en 1889 se convirtiese en un lugar común incluso en Gran Bretaña: «La investigación lenta y metódica de los fenómenos naturales es la madre del progreso industrial.»

EL PERIODO DE ACELERACION INDUSTRIAL (1750-1792)

Analizaremos primero el período hasta 1792, cuando el estallido de las guerras revolucionarias francesas detuvo, de hecho, el progreso del principal rival industrial inglés, Francia, y al mismo tiempo abrió un período de economía de guerra, que duró hasta 1815, durante el cual el comercio de todo el Continente, y aun el de los Estados Unidos de América, por no mencionar a Gran Bretaña y Francia, fue des-

viado de su curso normal, induciendo a los inventores —tal como en las guerras mundiales de nuestros días— a buscar nuevas metas. El comienzo del período, esto es, el comienzo de la revolución industrial en Gran Bretaña, se fecha de forma convencional a partir de la ascensión al trono de Jorge III en 1760, ya que este acontecimiento fue seguido rápidamente por adelantos claves en la industria textil (1764-69), por las vitales mejoras de Watt incorporadas a la máquina de vapor (1765-76), por un importante crecimiento de la metalurgia en Escocia y el sur de Gales y por los primeros pasos de la red de canales inglesa. Sin embargo, es más lógico situar hacia mediados de siglo el punto de partida. El largo período de paz bajo el gobierno de Walpole había presenciado el desarrollo inicial de la industria textil, como la lanzadera volante de Kay, y las mejoras introducidas en la hilatura por John Wyatt y Lewis Paul (p. 155). Las consecuencias de la rebelión jacobita de 1745 fueron un rápido crecimiento de las carreteras de portazgo y el clima intelectual de los años cincuenta, que indiscutiblemente preparó el camino a décadas industriales más revolucionarias. Así en 1754 se fundó la Society of the Encouragement of Arts and Manufactures, la cual seis años más tarde, inspirándose en los trabajos de Paul, comenzó a ofrecer premios a ulteriores mejoras en las máquinas de hilar. Entre tanto, en 1757 Josiah Tucker informaba que «en las industrias del metal de Birmingham y Sheffield, casi todos los maestros manufactureros tienen una nueva invención propia, y están mejorando diariamente las de los otros». Tales fueron los comienzos: en el transcurso de treinta años, de 1750 a 1780, el número de patentes se multiplicó aproximadamente por seis.

La revolución industrial había estado largo tiempo en gestación. En conjunto, es menos sorprendente el hecho de que haya aparecido a mediados del siglo XVIII, por ser éste un período de gobiernos estables, con una clase media confiada, unas guerras

llevadas a cabo por profesionales, con escaso daño para la economía, y sobre todo con un comercio europeo en expansión, que el hecho de que —por razones ya apuntadas (p. 65)— llegase primero a Gran Bretaña. Mientras que Italia, los Países Bajos, Francia y las grandes ciudades alemanas habían mantenido en los pasados siglos el liderazgo tecnológico y permanecido a la cabeza durante largo tiempo, ahora le había llegado a Gran Bretaña el turno de sacar un provecho decisivo de su geografía y de su historia. Partiendo de una situación insular, era natural que el pueblo encaminase sus empresas de tipo comercial y militar —las cuales estaban frecuentemente interrelacionadas— a través de los océanos, con sus ilimitadas posibilidades, en vez de, como lo había hecho Francia, dirigirlas a la explotación del continente. En un período en que la mayor parte del comercio extranjero se realizaba dentro de Europa, Inglaterra controlaba una parte importante del comercio oceánico, mientras que el hecho de que al firmarse la Paz de París en 1763 su marina mercante se hubiera multiplicado por seis en un siglo, parece sugerir que había encontrado medios de transporte adecuados para un vasto mercado transoceánico. En veinte años la marina mercante británica recibió un ulterior impulso cuando los holandeses, a consecuencia de su imprudente participación en la guerra marítima de 1778-1783, perdieron su posición, todavía preeminente, en el transporte comercial y muchas otras cosas.

Al mismo tiempo el empresario industrial y el técnico obtuvieron un buen número de incentivos de lo que podía ser llamado, justamente, la forma de vida británica. La gente descrita en las páginas de Fielding y Smollet disfrutaba de unas relaciones relativamente tranquilas entre las clases y las regiones, que hacían que el capital y el trabajo fuesen más móviles que en la mayor parte de los demás países. Su gobierno hacía, en términos relativos, pocos esfuerzos para dirigir y supervisar la producción, y

muchos menos aún para organizar manufacturas estatales, práctica tan sofocante para la iniciativa individual como grata a los déspotas ilustrados, como Federico el Grande de Prusia. Los gremios supervivientes carecían en general de poder —que poseían aún comúnmente en el resto del continente— para restringir la actividad de una clase media segura de sí misma, cuyos miembros no eran solamente libres de crearse fortunas del modo que gustasen, sino que, en caso de éxito, podían aspirar a entrar en las más altas esferas, valoradas en términos de distinciones intelectuales, sociales y políticas. Arkwright, que llegó a ser caballero; Wedgwood, que trabajó hasta los diez años en una rueda de alfarero y llegó a ser miembro de la Royal Society y patrón de Flaxman; y el estampador de indianas Peel, cuyo padre era un labrador acomodado, y cuyo hijo fue dos veces primer ministro, son tan sólo tres de los grandes precursores cuyos adelantos contribuyeron a estimular la ambición de sus contemporáneos. Goethe resumió un tipo de actitud ante la vida, lo mismo que ante las patentes, cuando escribió: «El inglés es libre de usar lo que ha descubierto hasta que conduce a nuevos descubrimientos y a actividades renovadas. Uno podría preguntarse por qué están entonces más avanzados que nosotros en todo.»

El término «revolución industrial», tal como se aplica a los cambios que afectaron a ciertas partes de Inglaterra, a las tierras bajas escocesas y al sur de Gales en los últimos años del siglo XVIII, es conveniente desde un punto de vista histórico, y refleja la gran importancia de los acontecimientos en cuestión tal como se ven de forma retrospectiva. Sin embargo, no existió una revolución en el sentido de las revoluciones estadounidense y francesa, esto es, un cambio fundamental, del cual fueron conscientes la mayor parte de los contemporáneos en algún sentido. Las mejoras de la agricultura, que ayudaron a alimentar a una población en rápido crecimiento, se difundieron sin duda con mayor amplitud, pero, con

todo, su introducción fue lenta y fragmentaria. El progreso experimentado en estos años por la industria del algodón, donde la máquina de hilar, continua o intermitente, e incluso el telar mecánico, fueron aceptados con mayor facilidad que en la conservadora industria lanera, que durante siglos había sido la principal fuente de riqueza británica, tuvo, con certeza, consecuencias revolucionarias; sin embargo, hasta diez años después de clausurado el período que estamos analizando el valor de las exportaciones de algodón no superó por primera vez el de la lana. La expansión de la industria del hierro, con sus nuevos y numerosos usos en la paz y en la guerra, fue, quizá, en conjunto, más sobresaliente. Cuando la práctica de la fundición al coque se difundió en todas las industrias, entraron en acción enormes altos hornos en las proximidades de las minas de carbón más accesibles, pero sólo en 1784, cuando fue posible transformar el arrabio en hierro forjado gracias al proceso de pudelación, pudo verse cómo la producción total británica de hierro aumentaba (p. 693). Es todavía más tentador pensar que la revolución derivó de la máquina de vapor de Watt. Las dos primeras se instalaron en 1774, con el fin de achicar una mina de carbón, y para hacer funcionar un alto horno, y hacia 1785 la máquina, en su versión rotativa, se había aplicado ya con gran escala a las fábricas de hilados de algodón, así como a las necesidades de las fábricas de cerveza y a otras antiguas empresas. Sin embargo, al expirar la patente de Watt en 1800 se habían construido algo menos de 500 máquinas; así que la producción media de las famosas fábricas de Soho (fig. 132) era tan sólo de una veintena al año. Además, su fuerza de vapor media, lejos de revolucionar las condiciones de la industria en los primeros años, no fue significativamente mayor que la producida por los molinos de viento o por las ruedas hidráulicas (p. 451).

Desde que el comercio, o la esperanza de comerciar, dieron el principal impulso inicial a las inven-

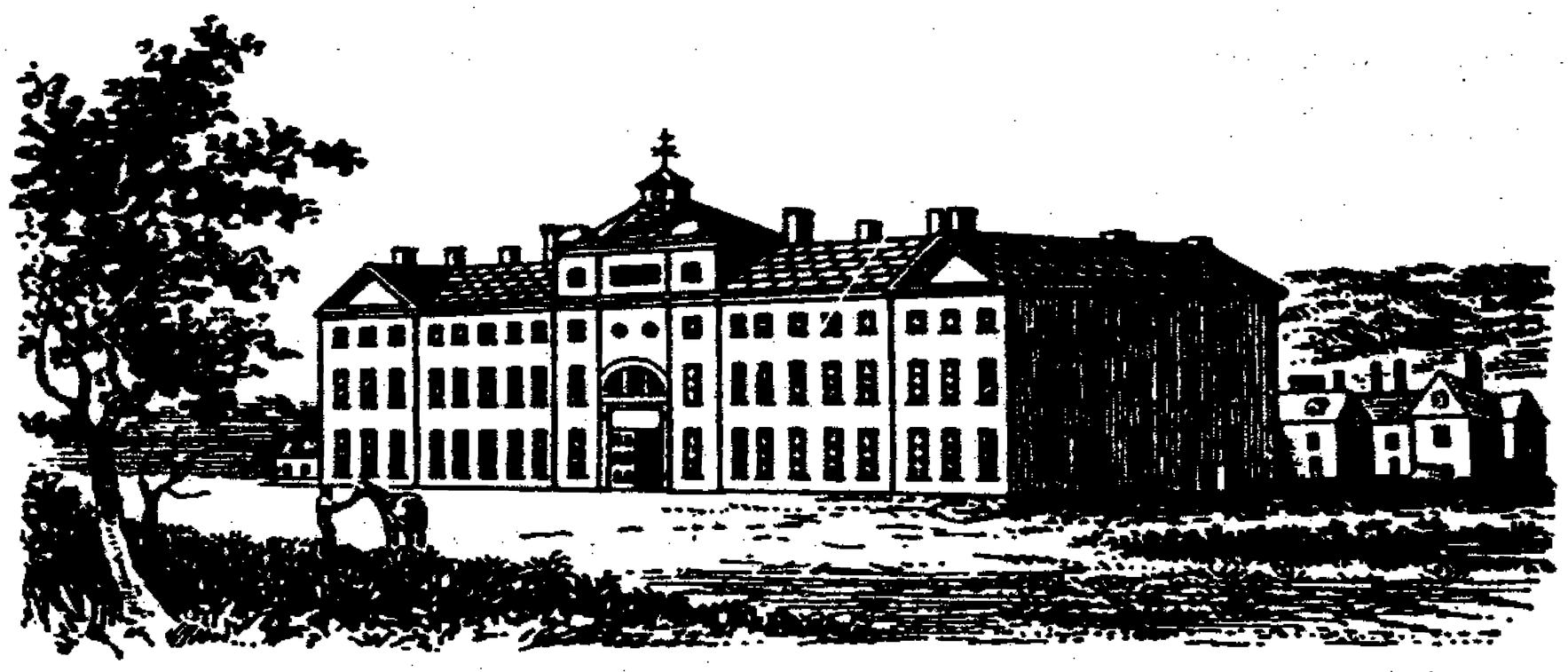


Fig. 132. Las fábricas de Boulton y Watt, en Soho, reconstruidas en 1795.

ciones, uno de los dos factores más importantes en los progresos de estos años fue la habilidad cada vez mayor de Gran Bretaña para financiar la expansión comercial. Mientras que, en conjunto, Europa se beneficiaba en gran medida de la notable reanimación de la producción argentífera en la América española, el oro de Brasil iba principalmente a Londres. Como un fenómeno cuyos efectos tuvieron mayor alcance, se da la circunstancia de que, por haber seguido todas las potencias el ejemplo de Federico el Grande —que había establecido bancos de crédito público con el fin de paliar los daños ocasionados por la Guerra de los Siete Años—, el único rival de Gran Bretaña en cuanto al número de bancos privados era Holanda. Los bancos regionales trabajaban directamente en los distritos industriales, mientras que los bancos mercantiles, en especial los instalados en Londres, facilitaban el comercio y la exportación a ultramar. Otro factor de importancia fue la influencia que ejercieron las guerras de 1756-1763 y de 1775-1783. Son evidentes sus efectos sobre el desarrollo de la industria del hierro: la inferioridad de los cañones navales franceses ya se había constatado en la Guerra de los Siete Años, y en 1774, cuando la disputa con las colonias norteamericanas estaba llegando a su punto culminante, John Wilkinson intro-

dujo un nuevo adelanto en la artillería británica con su taladradora, y posteriormente el desarrollo de esta herramienta hizo posible el perfeccionamiento de los cilindros de las máquinas de vapor de Boulton y de Watt. Las guerras intensificaron también las crisis comerciales periódicas, que fomentaron la competencia en la industria textil hasta tal punto que incluso los grandes inventores, como Samuel Crompton y Edmund Cartwright, se vieron en apuros. Así, a la Guerra de los Siete Años y a la Guerra de Independencia norteamericana siguieron breves períodos de depresión, en tanto que una tercera y más seria depresión estaba ya gestándose en tiempos de la siguiente crisis de las relaciones anglo-francesas de 1792-1793. Como el poder del Estado en el siglo XVIII era mucho menor que en la actualidad, los períodos de guerra provocaban fluctuaciones, más que una depresión general del comercio ultramarino; es significativo que en 1780, en el punto culminante de la guerra marítima contra Francia, la ferretería inglesa se siguiera exportando hacia este país vía Hamburgo.

La publicación de *La riqueza de las naciones*, de Adam Smith, en 1776; las reducciones generales de las tarifas aduaneras por Pitt y su acuerdo comercial con Francia (1786) señalan el comienzo del movimiento librecambista en Gran Bretaña. En el período de seis años en el que ello repercutió en las relaciones británico-francesas y en el período más amplio de libre comercio a mediados del siglo XIX, su primera consecuencia fue estimular el avance de la tecnología en Gran Bretaña, aumentando sus beneficios; pero la segunda fue estimular la rivalidad tecnológica. Sin embargo, al estallar la revolución política en Francia, la revolución industrial se hallaba lejos de estar monopolizada por Gran Bretaña, como lo estuvo de manera evidente inmediatamente después de Waterloo. Es probable que, excepto por lo que se refiere a períodos de guerra de larga duración, la reducción de las tarifas aduaneras de los textiles británicos en un 12 por 100 produjese sólo una baja

temporal de las manufacturas francesas. El obstáculo más duradero fue la disminución de las reservas de carbón en Francia, que mostraría todo su peso negativo con el desarrollo de una economía basada en el vapor; sin embargo, una Francia que tenía en otros campos una posición segura en cuanto al liderazgo industrial, podía haberse asegurado el uso del carbón de los países vecinos en términos favorables.

Volviendo de las reflexiones sobre mediados del siglo XIX a los hechos de 1786, un escritor inglés sostiene que por aquellas fechas «las industrias francesas parecían estar en una situación brillante, hasta entonces desconocida». En el transcurso de una generación los gremios habían sido debilitados, los monopolios comerciales derogados y reducidos los impuestos sobre el capital y los beneficios. La gran *Encyclopédie* francesa (1751-1772), con su gran cantidad de elegantes láminas (véase fig. 54), fue, entre otras cosas, el primer tratado global sobre tecnología. El impacto causado por Lavoisier en la agricultura, las finanzas públicas, e incluso en el sistema de medidas —era secretario de la comisión que inauguró el sistema métrico en 1791—, muestra que el gobierno francés superaba al británico al menos en que era consciente de la utilidad de los hombres de ciencia. Por otra parte, Francia contaba con otros inventores de ingenio, una fuerte tradición artística entre sus artesanos y numerosas industrias en expansión: por ejemplo, María Antonieta merece ser recordada por la protección dispensada a la producción de algodón.

Si las condiciones para el desarrollo de una manufactura son igualmente favorables a ambos lados de una misma frontera, será difícil impedir que los conocimientos teóricos la crucen. Ya que gran parte de la historia que recogemos en el resto de este libro se refiere a Gran Bretaña, por el hecho de que fue allí donde primero se desarrollaron los nuevos inventos, este aspecto requiere ser puesto de relieve de inmediato. Las leyes británicas contra la emigración

de artesanos y contra la exportación de maquinaria se mantuvieron en pie, más en la teoría que en la práctica, hasta 1825 y 1843, respectivamente. Sin embargo, por lo general, era imposible evitar que los inventos útiles llegasen a ser conocidos: los visitantes extranjeros siempre podían tener un pretexto para ver las máquinas; las descripciones encontraban frecuentemente un vehículo de expresión en las publicaciones técnicas, y las máquinas eran sacadas de contrabando con frecuencia, o exportadas contraviniendo órdenes difíciles de hacer cumplir. Los trabajadores especializados, sobre todo, eran inducidos —por las perspectivas de salarios altos y de promociones frecuentes a cargos tales como los de administradores y empresarios— a ir a países donde sabían que su especialización sería valorada.

John Kay, inventor de la lanzadera volante, vivió en Francia cerca de un cuarto de siglo antes de su muerte (en 1770), y allí mostró cómo se utilizaba su máquina, aunque ésta fue reinventada en 1790, lo que nos recuerda que es peligroso inferir de la eficacia de un invento su aceptación general. Una segunda figura significativa es la de John Holker, calandrero de Manchester, jacobita, que desempeñó el cargo de Inspector General de Industria en Francia de 1755 a 1786. Su importancia para la historia del progreso británico sobrepasa los límites de la industria textil: se le conoce por haber redactado las instrucciones para una gira a los centros ingleses del carbón y del hierro, así como a otras industrias, que el ingeniero francés Gabriel Jars realizó recién acabada la Guerra de los Siete Años, a fin de «conocer las razones por las que la industria se ha desarrollado más en Inglaterra que en Francia». Jars realizó algunos otros viajes oficiales al extranjero, y cuando había comenzado a difundir en Francia lo que había aprendido, murió, joven, en 1769, un año después de que hubiese sido elegido, conjuntamente con Lavoisier, miembro de la Academia de Ciencias. Pero seis años después su ejemplo impulsó a un fa-

bricante de hierro francés, Marchant de La Houlière, a fijarse en los trabajos de John Wilkinson (p. 692), cuyo hermano William fue invitado a establecer una fundición de cañones, por encargo del rey, en la isla de Indret, en la desembocadura del Loira. Recomendó usar hierro de Le Creusot para la construcción de los altos hornos que habrían de alimentar la fundición, y fue en Le Creusot, aunque no por iniciativa de Wilkinson, donde en 1785 comenzó a utilizarse el proceso por coque para la fusión del hierro, por primera vez fuera de Gran Bretaña. Un ejemplo aún más sorprendente de un invento clave que haya cruzado el canal de la Mancha con éxito nos lo ofrece la primera máquina de vapor, que se importó en 1779 con el fin de facilitar el bombeo para el suministro de agua del Sena a París. Los diseños necesarios y las partes metálicas grandes se enviaron a la firma Périer, que luego aseguraría que «ningún inglés había puesto la mano en el montaje de las máquinas». Los daneses fueron menos afortunados. En 1788 contrataron a un escocés para que construyese una máquina destinada al martillo de fragua del astillero de Copenhague: su erección costó más de 7.000 libras esterlinas, utilizaba tres veces más carbón que una máquina de Watt de la misma potencia, y tuvo que ser reemplazada después de doce años por la adquisición del artículo genuino.

Entre los demás países industrialmente avanzados en 1750, Rusia y Suecia fueron perdiendo su sólida posición como fabricantes de hierro a medida que el proceso de fabricación por coque fue difundiéndose por Europa occidental, pero desde la época de Emanuel Swedenborg —metalúrgico polifacético, socio de Polhem (p. 210) mucho antes de ser absorbido por la especulación religiosa, que murió en Londres— los suecos eran observadores atentos del panorama industrial de Occidente, e incluso invitaron a Matthew Boulton a trasladar sus actividades a su país. La conquista de Silesia por Federico el Grande, valiosa desde un punto de vista económico, unida

a la tradicional administración paternalista ya existente en Prusia y a la ruda energía del mismo rey, dio especial importancia a los acontecimientos prusianos. En Tarnowitz se halló una rica mina de plata, un poco antes de su muerte, y en 1789 Wilkinson dejó Inglaterra por segunda vez para introducir la fundición de coque en la Friedrichshütte. Un par de años más tarde la fundición por coque se estaba aplicando ya al mineral de hierro de la Alta Silesia, y antes de terminar la década Breslau tuvo el primer puente de hierro del continente. Es típico del afán con que el Estado prusiano trataba de alcanzar el desarrollo económico a partir de sus relativamente escasos recursos el hecho de que el barón Von Stein comenzase su carrera en el servicio de minas oficial, que le envió en 1786 a realizar una larga visita a Inglaterra, para adquirir la máquina de vapor de Boulton y Watt. La primera máquina se montó en Friedrichshütte en 1788, y al año siguiente, en Westfalia: la misión de Von Stein había conseguido planos, cilindros y algunos obreros. Hacia 1800 el Estado prusiano contaba con dos pequeños establecimientos para el montaje de máquinas, pero para entonces las relaciones entre una Gran Bretaña más industrializada y el resto del continente, más atrasado, se habían modificado considerablemente.

EL PERIODO DE LAS GUERRAS NAPOLEONICAS (1792-1815)

Al declarar la guerra a Austria y Prusia (20 de abril de 1792), y a Gran Bretaña y Holanda (1 de febrero de 1793), Francia inauguró un período de guerras que duraría, con dos breves interrupciones, hasta noviembre de 1815. Así, la segunda fase de la revolución industrial se vio afectada por la economía de guerra casi de modo continuado, pues las buenas relaciones comerciales con Francia, iniciadas por Pitt en 1786, no fueron renovadas durante los quince meses de la Paz de Amiens (1802-1803); y durante el

destierro de Napoleón en la isla de Elba en 1814-1815, Gran Bretaña, excepto en los dos primeros meses de 1815, se hallaba todavía en guerra contra Estados Unidos. Este régimen de guerra alcanzó su punto álgido entre 1806 y 1811, cuando Napoleón intentó excluir de la Europa continental al comercio británico y Gran Bretaña contrarrestó el bloqueo continental privando al resto de los países europeos de todo comercio que no pasase por los puertos británicos.

Comparar el esfuerzo bélico de las dos guerras mundiales, más breves pero más intensas, con las napoleónicas conduce, naturalmente, a conclusiones erróneas. Hoy en día cada combatiente de primera línea tiene tras de sí en el frente interior el respaldo de un esfuerzo bélico seis veces superior al que poseía entonces el soldado; además, el poder de los gobiernos para, a través de una organización adecuada o por medio de la propaganda, asegurarse de que el esfuerzo bélico siguiera la dirección deseada, era entonces mucho menor, tanto que apenas alteró la tranquila vida de la clase media descrita por Jane Austen. Como la escasez de alimentos, a diferencia de la de municiones, no exige notificación, el progreso más sólido fue, probablemente, el realizado en los cercamientos y, en general, en la mejora de la agricultura. Hacia 1815, si hubiésemos observado a vista de pájaro los campos labrados, tras largos siglos de lucha contra los bosques, pantanos y eriales, habríamos visto que estaban llegando finalmente a su máxima explotación económica. El esfuerzo repercutió ciertamente en las industrias de municiones, incluyendo la construcción, el armamento y el servicio de los navíos de alto bordo, de los que se vio que dependía la seguridad de la isla —la máquina de fabricar cuadernales introducida en el astillero de Portsmouth lo demuestra claramente (p. 512)—, pero, en general, el uso creciente del vapor y de la maquinaria permitió a Gran Bretaña aprovechar las ventajas que se derivaban de su supe-

rioridad en la producción de hierro. La guerra impulsó su uso también en las industrias textiles, para suministrar uniformes y mantas a los ejércitos británicos y a las muchas más numerosas fuerzas de sus aliados; Isambard Brunel pudo incluso poner en marcha una fábrica de botas militares con una máquina para remachar suelas, proceso que fue reconvertido en trabajo manual cuando terminó la guerra.

Al comparar la situación con otros períodos de guerra posteriores es importante recordar que Gran Bretaña, en esta ocasión, no recibió apoyo financiero fuera de Europa, y muy poco respaldo de sus inversiones acumuladas en ultramar. La suma de 57 millones de libras esterlinas que utilizó Gran Bretaña para crear y mantener las cinco coaliciones contra Francia requirieron un gran desarrollo del comercio de exportación. Algunas mercancías británicas se vendían prácticamente solas: el azúcar y el café coloniales reexportados, por ejemplo, eran exportados de contrabando desde Gran Bretaña a la Europa continental, así como las casacas, botas, e incluso insignias de los regimientos con que Napoleón, contraviniendo sus propias reglamentaciones, equipaba clandestinamente a sus soldados. Sin embargo, las manufacturas de telas de algodón, que se convirtieron ahora en la principal exportación británica, eran parte integrante del esfuerzo de guerra, no menos que las empresas comerciales, las cuales, en los doce meses que siguieron al rescate del monarca portugués de las garras napoleónicas, llevado a cabo por la flota británica, establecieron sesenta firmas británicas en su capital colonial de Río de Janeiro.

Los sufrimientos del pueblo durante los años de guerra fueron debidos probablemente a la guerra en sí más que a los cambios tecnológicos que la acompañaron, pero es probable que la idea de que la revolución industrial fue fundamentalmente un elemento opresivo date en parte de estos años. Después de 1799 el sindicalismo, al menos en teoría, fue suprimido totalmente, y una medida para mejorar las

condiciones de los aprendices indigentes que eran empleados en las fábricas dejó completamente sin control la explotación de los demás menores; tanto la reglamentación legal de los salarios como la obligación legal del aprendizaje se abandonaron formalmente, y el eclipse político de los *whigs* y de los radicales dejó al pueblo virtualmente sin medios para hacer oír sus quejas. Los disturbios ludistas (p. 838) a fines del período de guerra, aunque fueron fundamentalmente una protesta contra el abuso de un antiguo tipo de máquina —el telar para géneros de punto—, eran, sin lugar a dudas, síntomas de un malestar general. Los salarios aumentaron en los años de guerra, pero otro tanto hicieron los precios, y si había tejedores que trabajaban a mano y que ocasionalmente deambulaban con billetes de cinco libras sujetos a la faja del sombrero, era extraordinariamente más aparatosa la pobreza, aliviada de mala gana, siempre que las depresiones repentinas, a las que estaba particularmente expuesto el comercio de tiempo de guerra, hacían que las fábricas se detuvieran. Además, a medida que la fuerza de vapor fue sustituyéndose gradualmente a la rueda hidráulica, el trabajo de las fábricas comenzó a concentrarse en las ciudades, donde la escasez de madera, ladrillos y vidrio en los años de guerra permitió el establecimiento de un régimen de casuchas construidas de mala manera, rodeando los sólidos edificios, provistos incluso de iluminación de gas, que albergaban a la maquinaria.

Mientras tanto, ¿qué estaba sucediendo en Francia? Entre 1792 y 1799 la producción de textiles y el comercio en general se redujeron a un tercio de su cifra anterior. Los frecuentes cambios de gobierno, el período del Terror y la Ley del Máximo, por no mencionar la enorme depreciación de capitales, arruinaron la confianza y cortaron de raíz numerosas carreras prometedoras para la industria, como la de Lavoisier, que fue víctima de la guillotina, y Leblanc (p. 777), que perdió sus bienes y se suicidó en 1806.

Pero como muestra de la sorprendente energía del período revolucionario, el Comité de Salvación Pública se interesó por el proceso de fabricación de la sosa de Leblanc (aunque éste perdió los beneficios), y fueron creados el Politécnico y las escuelas de ingeniería civil y de minas, y el año 1798, cuando el declinar del Directorio fue preparando el camino a la toma del poder supremo por Bonaparte, fue honrado por la celebración de una exposición industrial. De todos modos, fue el período napoleónico el que repercutió en mayor grado en la tecnología.

El restablecimiento del orden y la instauración de un nuevo sistema legal bajo el Consulado y el Imperio dio a la industria una buena oportunidad para resurgir. En 1807 el código comercial proporcionó incluso una forma limitada de responsabilidad para los socios comanditarios en la industria, casi dos generaciones antes que en Gran Bretaña. El mismo Napoleón se interesó por las artes industriales: presenció una demostración del funcionamiento de la lanzadera volante, en un taller modelo, en Passy; hizo que Jacquard (p. 834) fuera desde Lyon con el fin de que hiciese funcionar su telar en el Conservatoire des Arts et Métiers, y exigió de sus prefectos que impulsaran el uso de una máquina para cardar e hilar lana, que un escocés fabricó en una isla del Sena. Hacia 1812 Alsacia había comenzado ya a emplear en sus hilaturas la fuerza de vapor en pequeña escala. Con todo, el interés principal del período napoleónico para el tema que estamos tratando no radica en esto, sino en las consecuencias de la política militar francesa, es decir, en la conversión de Europa occidental en lo que era en la práctica: una sola unidad económica, y en el intentó de hacer viable esta unidad frente al bloqueo comercial británico.

La vida económica francesa fue revigorizada, sin duda, por un incremento del 50 por ciento tanto en extensión como en población. La anexión de Bélgica, por ejemplo, significó que su producción de carbón, que era de unas 700.000 toneladas métricas al esta-

llar la Revolución, alcanzase las cinco millones de toneladas en 1807. Con todo —detalle significativo—, sólo Le Creusot vendía hierro fundido por coque, y esto no antes de 1810, cuando el Imperio ya marchaba hacia la catástrofe. Pero es al examinar los estados dependientes y satélites del Imperio napoleónico cuando nos encontramos con un giro en la historia económica sobre el que la historia europea no ha podido volver, pese a sus repetidos intentos. De la misma forma que el Nuevo Orden de Hitler, en 1940-1941, es imposible saber qué habría podido lograr esta Europa unificada, ya que en ella nunca hubo estabilidad: el fin del comienzo, cuando las fronteras de Francia alcanzaron Roma y Lübeck (1810), fue también el comienzo del fin. La producción de azúcar de remolacha es un progreso importante de este período, que nos recuerda la presencia constante de la presión británica. La abolición general de la servidumbre en los territorios conquistados por los franceses, imitada por los prusianos bajo el gobierno de Stein, para sus propios fines, en 1807, abrió el camino a todo el desarrollo posterior de la agricultura europea. En la orilla occidental del Rin, y en menor medida en otros lugares, la abolición de las restricciones al comercio local liberó nuevas fuerzas industriales. Napoleón fue un ardiente entusiasta de los canales, y hasta en las lejanas provincias de Iliria dejó su marca en la red de caminos. Se produjeron asimismo importantes desarrollos espontáneos en los estados satélites de Francia: en el Ruhr se alcanzaron 400.000 toneladas de carbón anuales; en Sajonia había en funcionamiento, hacia 1813, más de un cuarto de millón de telares para hilar algodón; en febrero de 1801 se instaló en Saint-Gall, Suiza, una máquina de hilar algodón, proveniente de Inglaterra; y los suizos inventaron independientemente un crisol para la fundición del acero.

Pero sólo Bélgica estaba experimentando una revolución real en su industria debida a causas excepcionales. Firmemente unida a Francia desde el verano

de 1793, esta antigua región industrial había recibido ya un nuevo estímulo de la política francesa del *laissez-faire* y de la apertura del tráfico comercial por el Escalda, cuando un inglés, William Cockerill, estableció seis años después en Verviers una fábrica de maquinaria para cardar lana y tejer. Su empresa se desarrolló posteriormente en Lieja gracias a la fabricación de maquinaria textil, la mitad de cuya producción se vendía en Francia. Lieja llegó también a ser el centro de una importante industria de municiones: y en 1800 se tendieron raíles de hierro en una fundición de cañones, de donde su uso se difundió a las minas de carbón; y en 1813 William Cockerill importó, como modelo, desde Inglaterra la máquina de Watt. Entonces se retiró; pero un empresario prusiano, que estuvo acuartelado con los hijos de Cockerill antes de la batalla de Waterloo, los encontró fabricando máquinas de vapor y prensas hidráulicas en tal escala que se vio inducido a contratar sus servicios en Berlín.

La guerra comercial europea tuvo también algún efecto sobre el desarrollo de los Estados Unidos de América, aun antes de la guerra contra Gran Bretaña de 1812-1815. Los estadounidenses habían comenzado a fundir cañones en Springfield durante su guerra de independencia, pero no fue hasta que ésta se logró cuando Samuel Slater, que había sido aprendiz del socio de Arkwright, estableció la primera factoría de algodón, y cuando Arthur y John Schofield introdujeron desde Yorkshire (Gran Bretaña) la máquina de cardar lana. La América libre actuaba como un imán sobre ingleses como Joseph Priestley, químico de Birmingham, y Tom Paine (p. 657), los cuales pasaron allí sus últimos años. Pero un paso aún mayor de este período fue la decisión de plantar el algodón tipo «sea island», procedente de las Bahamas, que se llevó a efecto en 1786 y se expandió enormemente como resultado de la invención de la desmotadora de algodón (p. 812), debida a Eli Whitney, por lo que de esta forma Estados Unidos contó con

una materia prima que podía recolectarse rápidamente y cambiarse por manufacturas de todas clases, que eran aún el objeto principal del comercio occidental del Atlántico. Desde 1793, sin embargo, la inseguridad del comercio europeo dio lugar al nacimiento de un sistema de factorías en pequeña escala para el hilado del algodón, mientras que después del comienzo de las hostilidades en 1812 fueron también numerosas las fábricas de lana a fin de surtir de uniformes a los militares y de ropas a los esclavos negros y, en cierta medida, también de ropas de mejor calidad. El estallido de la guerra fue debido, en gran medida, al éxito de la marina mercante estadounidense en su intento de conseguir excelentes beneficios de su neutralidad: el tonelaje registrado en el comercio exterior se incrementó ocho veces entre 1789 y 1810, de modo que las *Orders in Council* aplicadas por las fragatas británicas no sólo conmovieron el orgullo del joven Estados Unidos, sino también su bolsillo. En el mar, al menos, Estados Unidos

Fig. 133. Carga de un vapor algodonero. Hácia 1870.

no necesitaba ir a la zaga de ningún poder europeo: en el año que precedió al estallido de la guerra, la cual, obviamente, redujo el comercio ultramarino, Estados Unidos, que había sido el primero en hacer uso del barco de vapor en el Hudson (p. 476), lo utilizaba también en el Ohio, prefigurando el desarrollo pacífico, sin trabas, de las regiones bien provistas de vías fluviales (fig. 133).

DE WATERLOO A LA GRAN EXPOSICION (1815-1851)

En el período 1815-1851 los hechos más relevantes de la historia política nos ofrecen una guía segura para la historia del desarrollo económico. Por lo que concierne a la historia política inglesa, el desasosiego social de los años que siguieron a la guerra, la Ley del Grano de 1815 y la continuada lucha por su derogación, las revelaciones que condujeron a las leyes fabriles y a las de las minas de carbón, y la agitación cartista de 1839-1848, todo ello da una imagen de lobreguez y opresión sin posibilidad de alivio. Esto contrasta extrañamente con el sentido de realización nacional, tan claramente puesto de manifiesto en la Gran Exposición de 1851. En el mismo sentido, la historia de Europa es descrita como un período de reaccionarismo, siendo la monarquía de los Orleans, en Francia, la excepción que confirma la regla, pues cada acontecimiento desde su ascensión al trono en julio de 1830 debe verse como una contribución a su derrocamiento en 1848. Asimismo, de nuevo aparece a continuación un enorme y en apariencia inexplicable contraste cuando la Europa de 1848-1850 se ve sumergida casi de un extremo al otro por las luchas armadas en pro de los derechos liberales y la unidad nacional.

De todos modos, a los ojos del historiador económico, se trata de un período en el que Gran Bretaña, a quien las naciones europeas trataron de seguir con diversa rapidez, lleva una delantera decisi-

va: si tomamos el desarrollo del ferrocarril como medida aproximada, la Europa de los años 30 y 40 del siglo XIX hizo considerables progresos (fig. 134), y más aún Estados Unidos, pero al término del período Gran Bretaña poseía aún la red ferroviaria más completa y eficiente. Si en cambio valorásemos el período en términos comerciales, entonces podríamos comenzar con una etapa de recuperación a escala europea, unos cinco años después de la guerra,

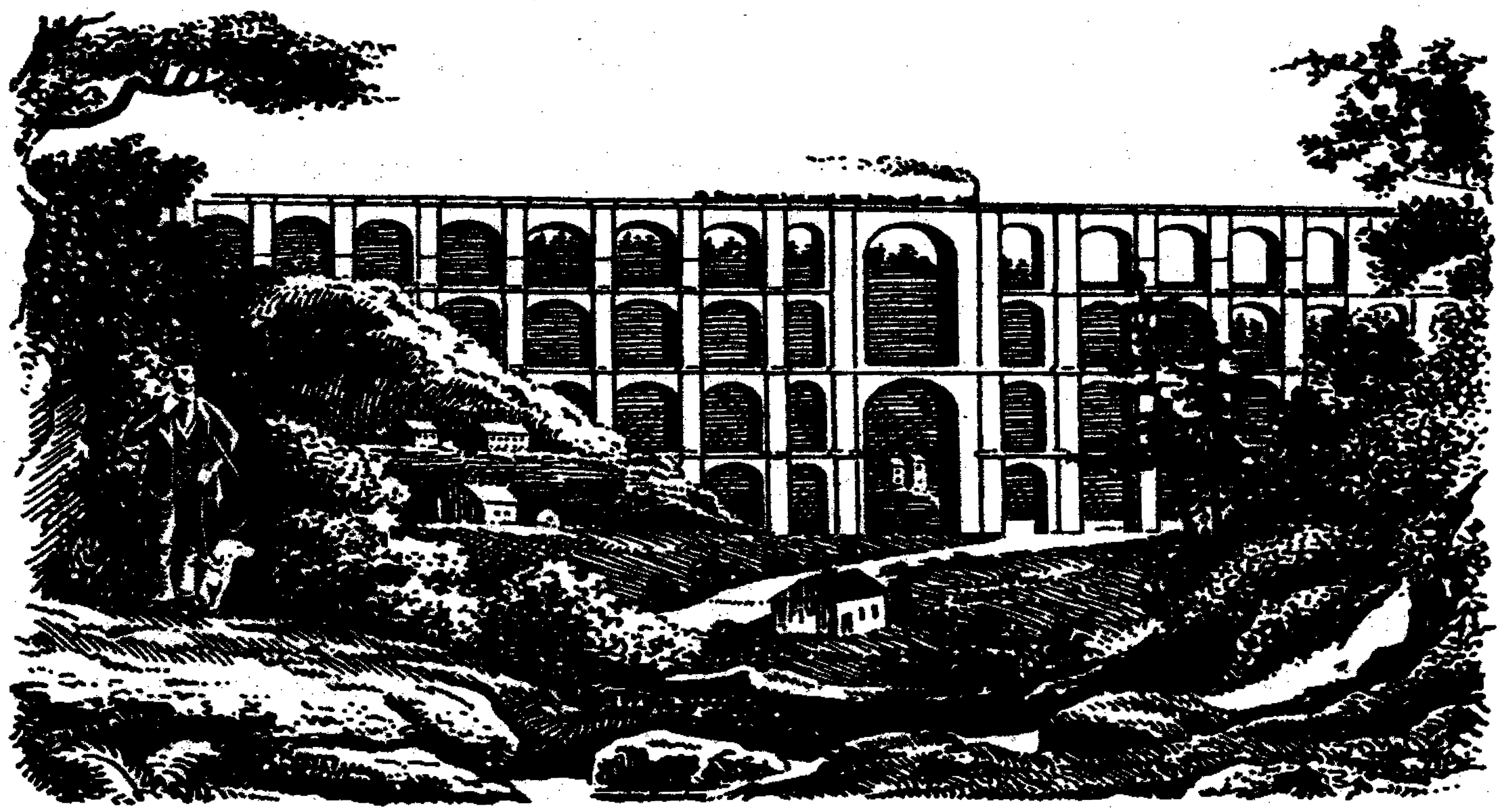


Fig. 134. Viaducto ferroviario en Sajonia, construido en 1845-1851.

que culminaría en el *boom* latinoamericano de 1824-1825, cuando doscientas cincuenta nuevas sociedades anónimas fueron registradas en Gran Bretaña. Asimismo, se produjo un *boom* en Estados Unidos entre 1832 y 1836, con una ulterior expansión en los años cuarenta, que se inició con la apertura del comercio chino, fue seguida por la «manía» de los ferrocarriles y culminó con el hallazgo de oro en California y en Australia. (De 1819 en adelante Gran Bretaña —sólo Gran Bretaña— se encontró en condiciones de basar completamente su moneda en el

oro, mientras que de 1844 en adelante la Ley de la Carta Bancaria de Peel dio al Banco de Inglaterra un prestigio que duraría más que el siglo.

Aun así, desde el punto de vista del historiador de la tecnología es importante ver cuáles fueron los procesos industriales en los que Gran Bretaña destacó. Uno de ellos fue su eficiente agricultura: en una sola generación, entre 1811 y 1841, en tanto que las leyes del grano impedían la entrada de importaciones, la proporción de familias que estaban empleadas en tal actividad disminuyó de un tercio a un cuarto del total. Esto significó que Gran Bretaña pudo disponer de una parte de población notablemente mayor que la de otras naciones europeas para dedicarla a otras actividades industriales básicas, como la minería de carbón, cuya producción se cuadruplicó aproximadamente en el mismo lapso de tiempo. Este fue un período de gran trascendencia para el hierro por la construcción de vías férreas como innovación principal, si bien el rey del comercio de exportación fue sin duda el algodón (fig. 135), que hacia 1851 daba

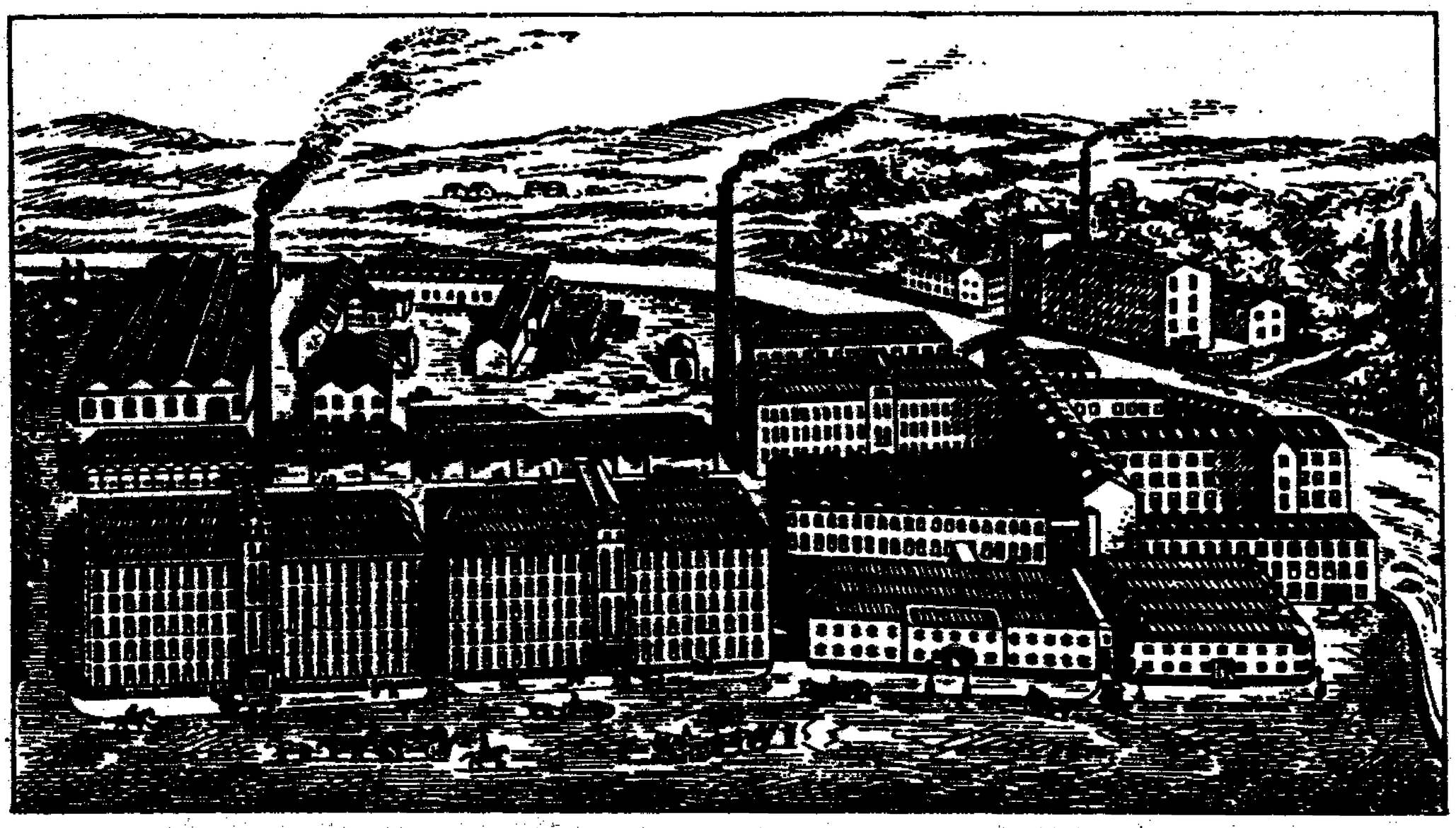


Fig. 135. El complejo Anchor Thread, de Clark. Mediados del siglo XIX.

trabajo a más de medio millón de obreros, empezando por los anudadores de nueve años de edad. Sin embargo, desde el punto de vista de la difusión de técnicas avanzadas, la tendencia más característica fue el incremento de la industria de maquinaria, basada en el desarrollo de las máquinas-herramienta, debido a hombres como Maudsley y Nasmyth.

La difusión de la revolución industrial por el resto de Europa fue, en cierta medida, resultado, y en cierta medida también causa, de la preponderancia de la industria de maquinaria británica. En realidad, Bélgica llegó pronto a ocupar una posición que, aunque a pequeña escala, era semejante a la de la propia Gran Bretaña. Bélgica poseía no sólo carbón y mineral de hierro, sino una magnífica posición para el tráfico comercial de paso, y gobernantes (Guillermo I de los Países Bajos y Leopoldo I, primer rey de los belgas) que siguieron el programa de desarrollo francés. En 1817 los Cockerill fundaron una gran fábrica de maquinaria en Seraing, adonde, según un informe oficial británico, las nuevas invenciones llegaban «diez días después de aparecer en Inglaterra». En los años 30 los belgas vendían maquinaria a Holanda, Alemania y Rusia, y fabricaban ya sus propias locomotoras. Cuando el ferrocarril Bruselas-Malinas fue inaugurado en 1835, transportaba más pasajeros que los que circulaban por todas las líneas existentes en Inglaterra.

Diez años después de la terminación de las guerras napoleónicas se supone que había 15.000 trabajadores ingleses en Francia, lo que representaba una importante contribución a su crecimiento industrial, que, aunque menos rápido que el inglés, dio comienzo bajo la dinastía borbónica restaurada y fue la característica dominante del reinado de Luis Felipe (1830-1848). Marc Seguin, que trazó la primera línea férrea de dieciocho kilómetros en Saint-Étienne, fue uno de los mejores entre los primeros ingenieros de ferrocarriles, aun cuando la red de ferrocarriles, que creció lentamente hasta los tiempos de Napoleón III,

debió mucho a los constructores de vías férreas ingleses como Thomas Brassey: una de las más importantes líneas, la línea París-Ruán, construida entre 1841 y 1843, fue patrocinada por un diplomático inglés con un tercio de capital inglés, empleando sólo conductores ingleses y locomotoras fabricadas en Francia por una firma inglesa. Hacia mediados de siglo el uso de la fuerza de vapor en Francia, que había carecido de entidad bajo Napoleón I, alcanzó 67.000 cv en total, un poco menos de la utilizada entonces en Gran Bretaña sólo para el algodón. La gran industria, en conjunto, empleaba tan sólo la cuarta parte de la mano de obra francesa utilizada en las manufacturas domésticas, y al menos la mitad de la producción de lingotes de hierro se fundía aún en hornos de carbón vegetal distribuidos por todo el país; sin embargo, la producción francesa de carbón se multiplicó por seis en el transcurso de una generación y antes de 1850 se habían desarrollado los sistemas modernos, por lo que Francia importaba un 50 por 100 adicional para satisfacer sus necesidades. También por esta época, una mayor lentitud en el progreso de la agricultura, debido al hecho de que la mano de obra rural se conseguía más fácilmente si iba dirigida a la industria, completó los preparativos para un período más importante desde el punto de vista del progreso industrial, asociado con el reinado de Napoleón III (1852-1870).

En el caso de Alemania, si bien la historia política hasta 1848, año de las revoluciones, está lejos de ser tan agitada como la francesa, el notable desarrollo tuvo una obvia significación económica. La Alemania de 1815 estaba formada por treinta y ocho Estados soberanos, el mayor de los cuales, Prusia, se componía de fracciones de territorio muy separadas entre sí, incluyendo una nueva y extensa adquisición en el valle del Rin; como consecuencia, la diplomacia prusiana pronto se ocupó de establecer la famosa Unión Aduanera (o *Zollverein*). Hacia 1834 ésta incluía a toda Alemania excepto una porción del noroeste,

donde la influencia británica había facilitado la aparición de un contrapeso, y hacia 1840 las tarifas aduaneras, que eran bajas pero que tendían a subir, fueron lo suficientemente irritantes como para que un investigador británico (John Bowring) fuese enviado a tantear la fortaleza de la nueva unión prusiana. Sin embargo, Alemania aún estaba muy por detrás de Francia. La poblacion de sus veinte mayores ciudades juntas no superó nunca en más de un 50 por 100 a la de París, y Prusia era tan sólo un 2 por 100 menos rural al fin del período que a su comienzo. Francia, sin embargo, contaba con menos ferrocarriles que Alemania —en 1850 cerca de dos tercios del kilometraje—, pero esto se hallaba paliado en parte por la superioridad de los canales y caminos franceses sobre los de Alemania, donde, una generación después de 1815, la mejor red de comunicaciones era aún la dejada tras de sí por los ocupantes franceses de Renania y Westfalia.

Las grandes diferencias quizá explican el hecho de que muy pocos artesanos británicos buscaran empleo en Alemania, pero pese a su pequeño número, la influencia británica no dejó de ser poderosa. La fábrica de los Cockerill en Berlín tenía su contrapartida en Wetten, en el Ruhr, donde había dos ingenieros británicos y un moldeador adiestrado por Maudslay, y en Berlín (fig. 136). Los ferrocarriles alemanes, aunque habían sido construidos según los métodos estadounidenses, más baratos, llevaban la impronta de George Stephenson, pues habían adoptado el ancho de vía británico, que no se adecuaba demasiado a las necesidades alemanas. En 1845 los ferrocarriles alemanes utilizaban tres veces más locomotoras extranjeras que alemanas, y de cada tres extranjeras, dos eran de construcción inglesa. Sobre todo, los alemanes eran asiduos visitantes de las instalaciones industriales británicas. P. C. W. Beuth, primer director del Intituto Industrial de Berlín, que después sería la Escuela Superior Técnica de Charlottenburg, fue el más influyente de forma inmedia-

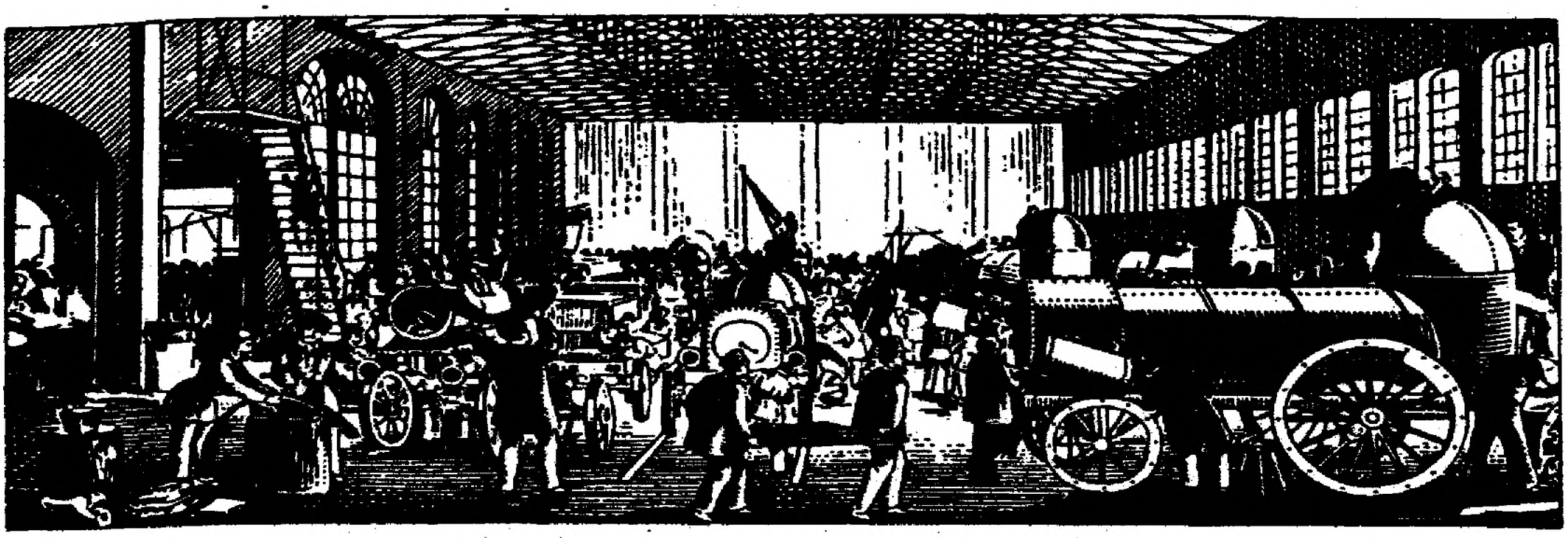


Fig. 136. Instalaciones Borsig para la fabricación de locomotoras y maquinaria, Berlín.

ta: visitó a Maudslay en dos ocasiones distintas e investigó las ventajas del ferrocarril Stockton-Darlington apenas éste se inauguró. Sin embargo, desde el punto de vista del futuro, merece una mención especial un estudioso de la producción de acero inglesa en 1838-39: Alfred Krupp, heredero de una pequeña acería en Essen.

Como una ola en un estanque se difundió la revolución industrial hacia Bélgica y Francia, hacia Alemania, y después aún más lejos. En 1840 murió uno de los Cockerill en Varsovia tras un intento fracasado de concertar un importante contrato de ferrocarriles con el zar Nicolás I. En 1841 se habían fabricado en Austria 35 máquinas de vapor, con un total de 434 cv, y estaba principiando el desarrollo de la manufactura textil y de la fabricación de maquinaria en Bohemia, que continuaría siendo, a lo largo del siglo, el corazón industrial del extenso Imperio de los Habsburgo. Antes de que finalizase el siglo, Cavour, tras estudiar la Inglaterra de sir Robert Peel en su propio terreno, se preparaba para transferir al norte de Italia los principios del libre comercio y la expansión de las manufacturas. Pero la Alemania sobre la que informó John Bowring en 1840 atrae inevitablemente una atención especial a

causa de los logros tecnológicos de una Alemania más moderna. Según él, Alemania estaba casi adelantando a Inglaterra en tres aspectos: el arte del diseño y su aplicación a diversas obras; una tradicional habilidad en el trabajo artístico del metal, tal como la fabricación de cuchillos; un sistema educativo muy amplio que ya afectaba a la industria. «La ciencia química —escribía en su informe— está más avanzada que en nuestro país»; Bunsen estaba alcanzando la fama en aquel momento, y en 1840 Justus von Liebig, que había sido profesor en Giessen desde 1824, publicaba su *Die Organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie.*

Entre tanto Estados Unidos, aunque raramente considerado con la adecuada estima por los observadores europeos, se aproximaba casi más que las potencias europeas a una posición de rival tecnológico de Gran Bretaña. Entre 1815 y 1850 la población estadounidense casi se triplicó; hacia la última fecha citada ya excedía a la británica, y en el último lustro la proporción de inmigrantes respecto a la población total alcanzó su máximo absoluto. Ya la apertura del país puso a Estados Unidos a la cabeza en ciertos aspectos: había, por ejemplo, un enorme interés por las comunicaciones internas. Así, a los diez años de comenzar la construcción de ferrocarriles la longitud de las líneas excedía con mucho a la de Europa, y se calcula que a fines de los años cuarenta los vapores de los ríos del oeste quizá tuvieran un tonelaje mayor que el de los barcos utilizados por todo el Imperio británico. En las rutas marítimas los clípers a vela eran, en condiciones favorables, más rápidos que los vapores, y el crecimiento general de la navegación bajo el pabellón de las barras y estrellas permitió al presidente Polk predecir en 1847 el eclipse de la marina mercante británica. También las manufacturas se generalizaron en Estados Unidos, en especial tras la introducción de la fundición de hierro con antracita en vez de carbón vegetal en 1840; el uso del coque fue inmediatamente posterior a la gue-

rra civil. Si las manufacturas de calidad más fina todavía provenían de Europa —si bien la «finura» se exageraba a veces, pues la Birmingham victoriana enumeraba, entre sus exportaciones menores, *tomahawks* e incluso empulgueras— era debido a que la alta calidad de la producción traía consigo habitualmente confiar cada uno de los procesos a expertos que trabajaban en una unidad especial, mientras que los estadounidenses preferían todavía llevar a cabo cada proceso de modo simplificado y bajo el mismo techo, como parte de una política economizadora de fuerza de trabajo necesaria en un país donde la baratura de la tierra encarecía la mano de obra. Por el contrario, los inventores estadounidenses destacaron rápidamente en la tarea de patentar diversos medios de ahorrar fuerza de trabajo, que a su vez multiplicaban el esfuerzo de un solo hombre trabajando por su propia cuenta. Esto se hizo evidente en la Gran Exposición de 1851, en la que los estadounidenses, que tenían fama de «producir para las masas», atrajeron la atención del público con la segadora de McCormick, ideada para ahorrar mano de obra (página 991), la máquina de coser (p. 841) y el revólver Colt (p. 519).

El éxito de la exposición fue quizá un fenómeno tanto social como económico. Asistieron a ella seis millones de visitantes llegados en tren de todas las regiones del Reino Unido y de otros lugares; y el hecho de que masas de gente tan grandes (e inesperadamente disciplinadas) pudieran y quisieran pagar una entrada de más de un chelín para presenciar un espectáculo tan edificante hizo pensar a muchas personas honradas que, en el primer gran país industrializado del mundo moderno, las masas hallaban cierta satisfacción ante el fruto de sus esfuerzos. Por otro lado, la principal reacción de William Morris, a la edad de diecisiete años, fue quedar estupefacto por la fealdad general de los objetos expuestos. En cuanto a su calidad técnica, Gran Bretaña pudo satisfacer su inconfesado deseo de superar a trece paí-

ses europeos, trece americanos y siete participantes más, aparte de las colonias. Si los vecinos de Gran Bretaña habían tenido intención de aprender de este país lo provechoso de la paz, la exposición fue un fracaso, ya que desembocó en dos décadas de guerra. Si se había tenido la intención de marcar un hito sólo en el autoconfiado surgimiento de la tecnología industrial británica fue también un fracaso. Si hasta aquí la industria británica había procedido de éxito en éxito, sólo dieciséis años después la Exposición de París fue testigo de la derrota de los técnicos británicos a manos de la superior inventiva de sus rivales de otros países, y al término de las dos décadas de guerra en Europa y en América el desarrollo técnico estaba entrando en una nueva fase, encabezada por nuevos líderes. Hacia fines de siglo el Crystal Palace, reconstruido en Sydenham, sobrevivía como un recuerdo abandonado de la pasada supremacía británica.

EL PERIODO DE LUCHAS NACIONALISTAS (1851-1871)

En los años 50 y 60, con todo, Gran Bretaña fue más que nunca el taller del mundo. Aunque una detallada comparación de lo exhibido en la exposición británica demostrara que este taller era menos fecundo en ideas de lo que fuera antaño, el hecho es que en una época de agudos conflictos políticos que darían lugar a una serie de grandes guerras —llevadas a cabo sucesivamente en suelo ruso, italiano, estadounidense, danés, centroeuropeo y francés, aunque no en el británico—, Gran Bretaña podía vender todo aquello que quisiera fabricar. En veinte años (1855-1875) el valor de las exportaciones *per capita* del Reino Unido —para una población que además crecía rápidamente— aumentó de cuatro a seis libras esterlinas. La tendencia hacia el libre comercio mundial, que llegó a su punto álgido en estos años, dio un estímulo a las exportaciones británicas que no

hubiera existido si el mundo no hubiese estado necesitado de ellas.

La supremacía británica en la industria textil seguía sin tener competidores. La utilización creciente del hierro y del vapor en la navegación amplió el campo de acción de los fundidores de aquel metal y de los constructores de maquinaria, los cuales estaban ya por estas fechas difundiendo el ferrocarril por numerosos lugares del mundo. Por añadidura, la invención de un acero barato —gracias al procedimiento de Bessemer, en 1856, y por el procedimiento del horno de reverbero de Siemens, diez años más tarde (p. 706)— permitió a Gran Bretaña forjar y trabajar un nuevo material, aunque el hecho de que un raíl de acero, por ejemplo, durase diez veces más que uno de hierro hizo temer una posible restricción de la demanda. Como llegó un momento, en 1851, en que los resultados del censo mostraron que Gran Bretaña estaba dividida en dos mitades iguales, una rural y otra urbana, puede suponerse que el enorme esfuerzo industrial de las dos décadas siguientes solamente podría llevarse a cabó a expensas de la agricultura. En realidad los trabajadores necesarios provinieron en gran medida de la agricultura, lo que redujo su disponibilidad de un poco menos de dos millones a algo menos de millón y medio en este lapso de tiempo. De todas maneras, la superficie labrada y, lo que es aún más significativo, la superficie dedicada al trigo alcanzó un nuevo punto de máxima extensión a fines de los años sesenta: por ello la progresiva eficiencia de la agricultura pudo ser equiparada francamente con la de la industria.

En 1848 John Stuart Mill había puesto en duda, en sus *Principles of political economy* (Principios de Economía política), que el progreso en el campo de los inventos hubiera hecho algo por disminuir las penalidades de los obreros. Es muy posible que la tarea del pudelador, la del maquinista de las primeras locomotoras, cuya cabina no tenía techo, y la del trabajador de las minas de carbón —cuyo número

en estos veinte años ascendió de 200.000 a 300.000— fuese tan fatigosa como cualquier otra de las que exigía la antigua economía rural. Pero de los años cincuenta en adelante, y debido a un empleo continuado y al hecho de que los salarios aumentaron casi más de prisa que los precios, se hizo realmente evidente que el obrero industrial británico sacaba provecho de la revolución industrial. Podía comer carne y pan blanco, producidos por una agricultura que había hecho verdaderos progresos; su ropa era de mejor calidad si la comparamos con la del pasado, confeccionada en casa; y merece atención especial el hecho de que el incremento de los salarios significase un aumento de la higiene de su persona, vestidos y vivienda. La tasa de mortalidad, que había aumentado en los centros urbanos después de las guerras napoleónicas, comenzaba a disminuir, salvo en lo concerniente a la mortalidad infantil. Las epidemias de cólera, de las que la más dura había sido la tercera, en 1865-1866, habían sido vencidas gracias al sistema de saneamiento general, hecho posible por el desarrollo industrial, que impidió que se repitiera la epidemia de tifus de Londres de 1838, que, por primera vez, había atraído seriamente la atención sobre las míseras condiciones de la población urbana pobre. Ya que ni la Guerra de Crimea ni la rebelión de los cipayos en la India, que había estallado inmediatamente después, repercutieron en la vida de la población civil del país, puede decirse muy bien que el inglés de todas las clases sociales, ya mediado el reinado de la reina Victoria, era vagamente consciente de las ventajas que le reportaba una herencia tecnológica superior, que en lo fundamental no era compartida por otros pueblos. Fue en este período cuando la media fiesta de los sábados, que se conocía en otros países por semana inglesa, se convirtió en una característica peculiar de la vida de los distritos fabriles ingleses.

En Francia, el Segundo Imperio (1852-1870) fue el paraíso del empresario industrial, pues el gobierno

era suficientemente autoritario como para reprimir las reivindicaciones obreras, mientras que basaba su prestigio en las espectaculares realidades del progreso material; se dio prisa asimismo en completar la red ferroviaria, al mismo tiempo que era lo suficientemente ilustrado para estimular las obras públicas, así como para propugnar reducciones en las tarifas aduaneras. Fue la época de Louis Pasteur y de Pierre Martin (p. 705); el mismo Emperador había escrito un tratado sobre artillería, y se había interesado vivamente, de modo personal, en proyectos tales como una industria experimental de aluminio (p. 720). La Exposición de París de 1867, a la que ya hicimos alusión, la construcción del canal de Suez por Lesseps —que fue inaugurado por la emperatriz Eugenia en el último otoño de su reinado— y la quintuplicación de la fuerza de vapor francesa en las dos décadas de Imperio nos sugieren que la caída del régimen puede atribuirse menos a su propia debilidad que a la creciente fuerza de su enemigo hereditario.

En el campo de la agricultura, el *junker* prusiano de las grandes llanuras orientales controlaba un tipo de hacienda que, comparada con las propiedades campesinas francesas, podía prestarse fácilmente, por sus características propias, a la adopción de técnicas modernas. Ahora la industria alemana comenzaba a sacar provecho del desarrollo relativamente temprano del ferrocarril (fig. 137 A), del poderío comercial de la *Zollverein* y, por último, sin que sea el hecho menos importante, de las ambiciones prusianas personificadas en Bismarck. Hacia 1860, gracias al impulso dado por los ferrocarriles, Alemania producía un 50 por 100 más de carbón que Francia. En cuanto al hierro en lingotes, por otro lado, la situación era, en este período, algo más favorable a Francia que a Alemania; pero el decenio durante el que Prusia sostuvo tres guerras en siete años —contra Dinamarca, contra Austria y contra Francia— fue también el decenio en que Alemania, bajo dirección prusiana, expandió la industria del hierro de tal

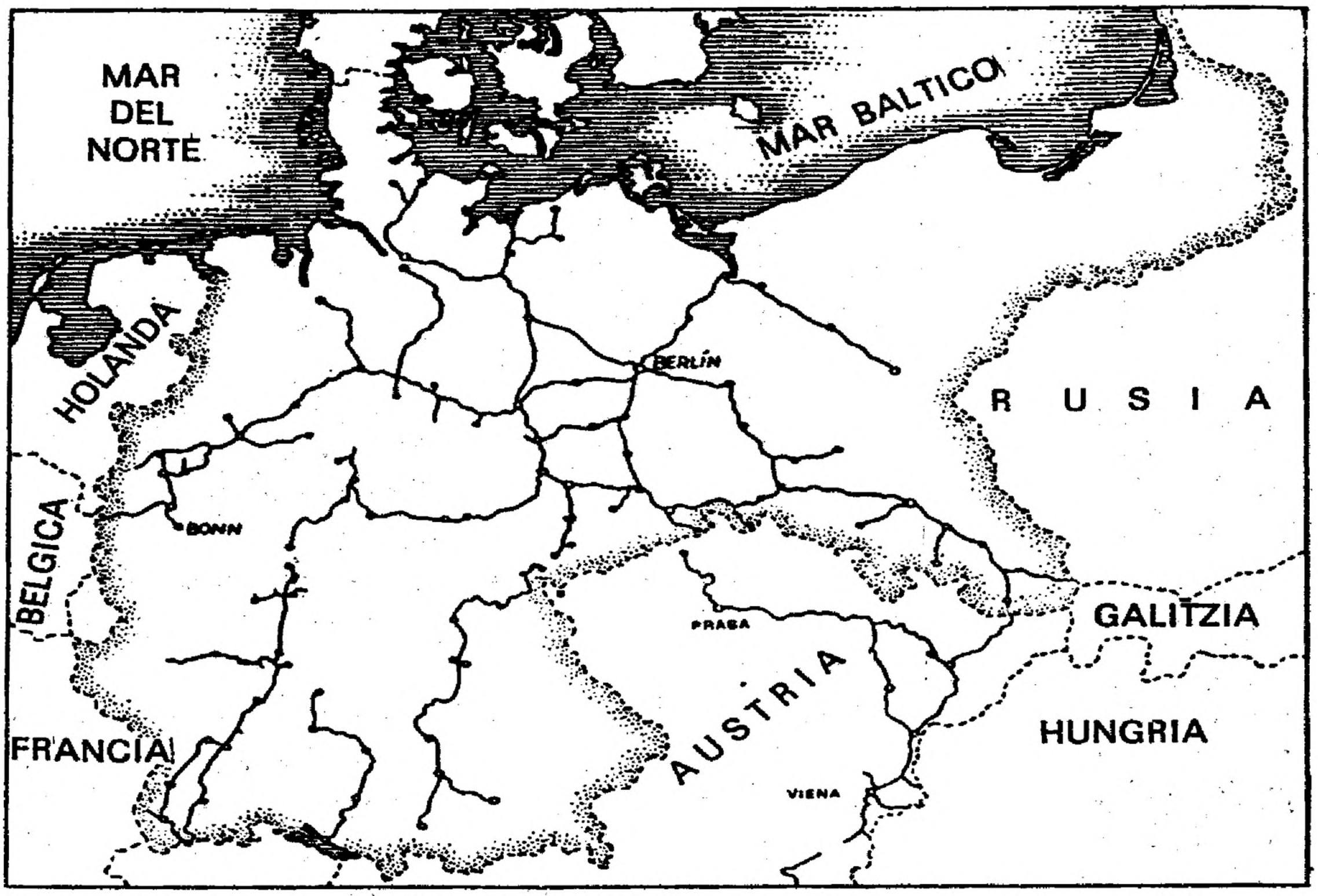


Fig. 137a. Red ferroviaria de 1850, comprendida en las fronteras alemanas de 1871.

modo que en vísperas de la guerra franco-prusiana ya superaba a la de su vecina y rival occidental. Cuando Von Moltke movilizó sus fuerzas para la guerra de 1870 pudo basarse en una vasta red ferroviaria (fig. 137 B) —de hierro—; la industria del acero y el hierro de Krupp abasteció a la artillería (figura 138); y trenes y cañones, conjuntamente, hicieron posible la prolongada demostración de fuerza, ante la cual, finalmente, se rindió París.

La guerra civil estadounidense de 1861-1865, conflicto de mayor envergadura, con mucho, que las cinco guerras europeas de la época, tuvo también una importancia más inmediata para la historia de la técnica que todas las guerras de nuestro siglo. En la década anterior al comienzo de la guerra, el desarrollo de Estados Unidos fue, hasta cierto punto, extra-

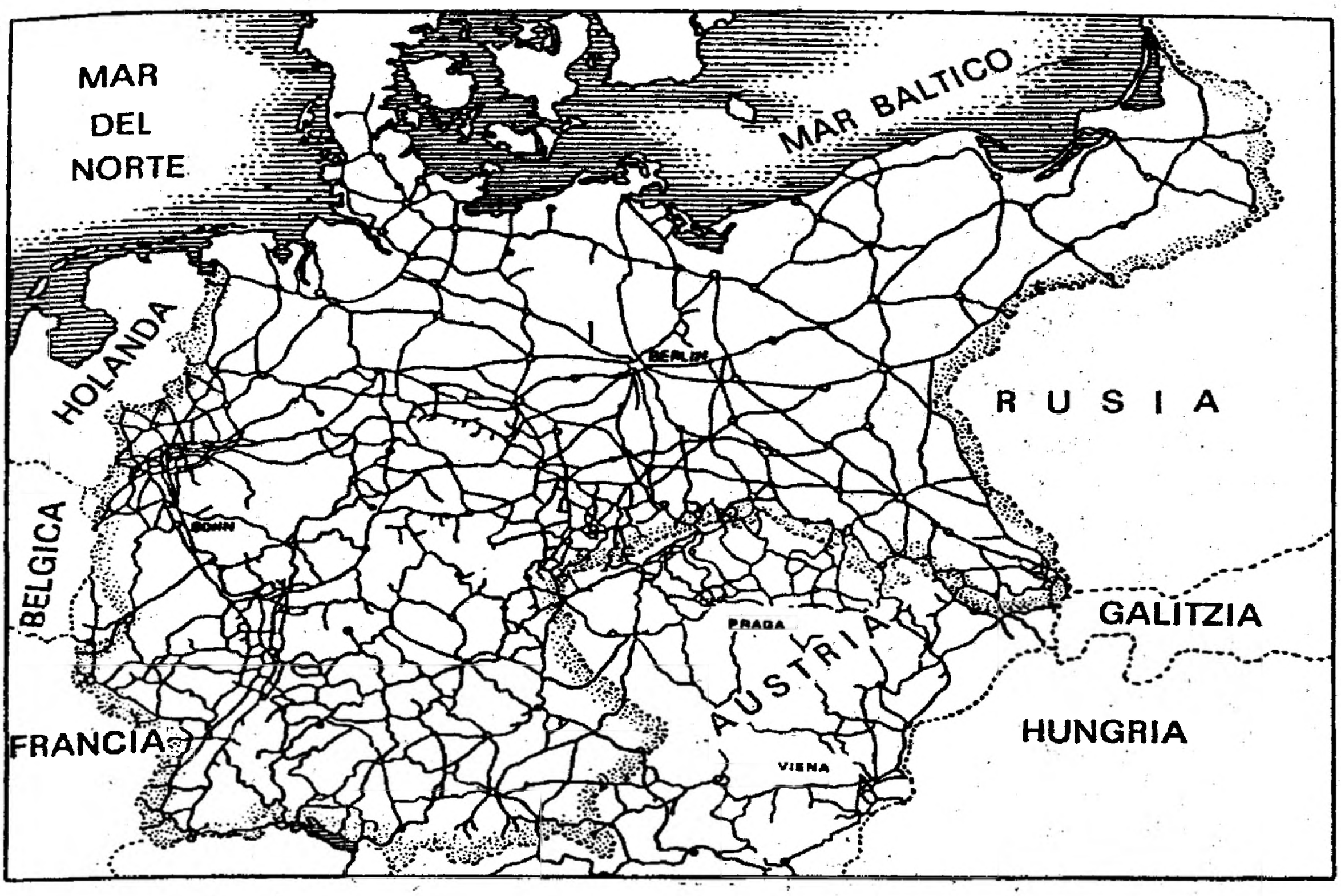


Fig. 137b. Red ferroviaria de 1880, comprendida en las mismas fronteras de la fig. 137a.

ordinariamente rápido. La longitud de las vías férreas aumentó en este período de 16.000 a 48.000 kilómetros, lo cual era más del doble de la red existente en el Reino Unido; mientras que los inventos encaminados a ahorrar fuerza de trabajo, patentados por millares, llegaron a ser un rasgo típico de la vida nacional, puesto de relieve por un visitante de la categoría del geólogo sir Charles Lyell. Aún más sorprendentes son las frases escritas por Walt Whitman en 1856: «Colosales fundiciones, fuegos llameantes..., abundancia y profusión de materiales, poderosas piezas de acero; tal es el símbolo de América». Sin embargo, hasta que la guerra no terminó, asegurando que el futuro del país estaría en manos de un gobierno único basado en los principios de libertad y la abolición de la «peculiar institución» de la esclavitud, Estados

Unidos permaneció, en otro sentido, económicamente atrasada. Porque una mitad del territorio estadounidense, situada entre el meridiano 97 y los asentamientos de la costa del Pacífico, contenía tan sólo el 1 por 100 de la población. En 1860 aún no se habían percatado de que el ganado podía invernar y hallar pastos en regiones tales como el norte de Nebraska, y mucho menos de que los muchos millones de europeos podían ser atraídos tan sólo por la construcción de un ferrocarril transcontinental con el fin de que conquistasen para el arado las vastas extensiones solitarias .

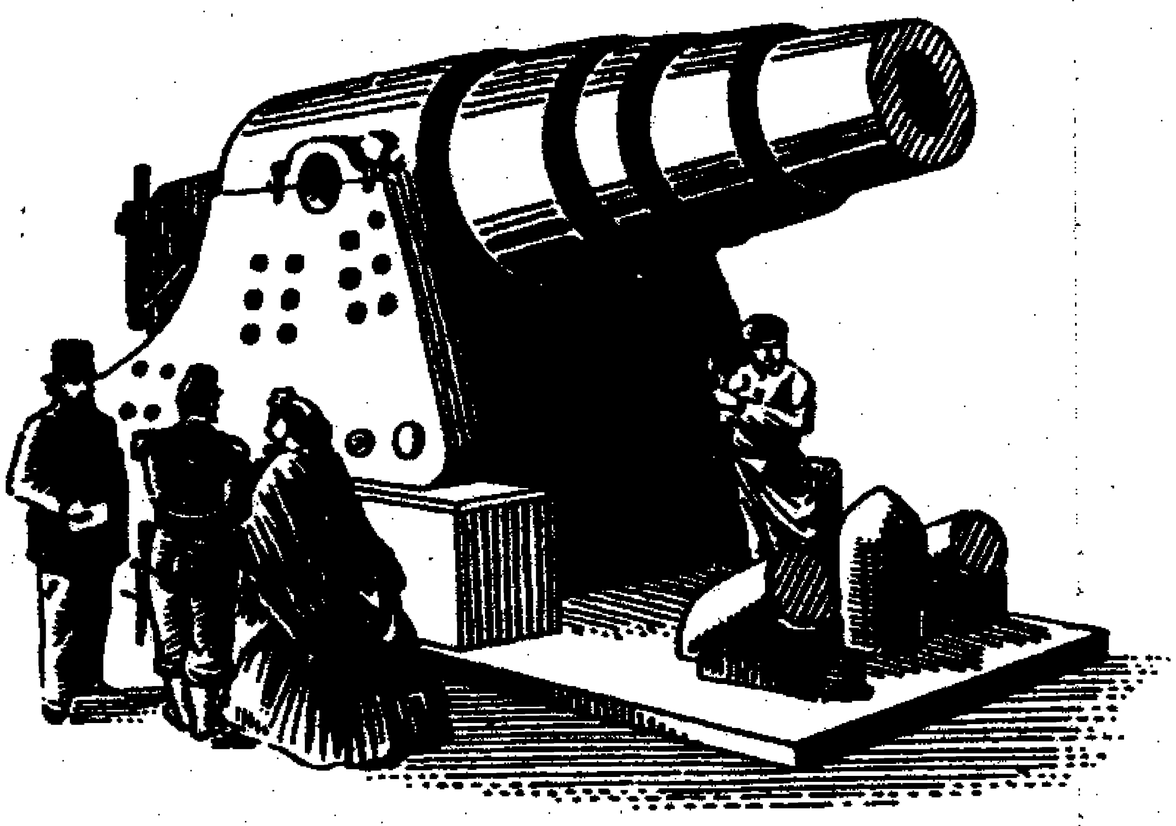


Fig. 138. Cañón de cincuenta toneladas, exhibido por Krupp en la Exposición de París de 1867.

La influencia de la guerra sobre la tecnología fue muy variada. Las industrias de armamentos del norte se desarrollaron con tal rapidez y habilidad (figura 139) que en gran medida determinaron la victoria, desde el momento en que los confederados hubieron de depender fundamentalmente de armamento importado, siempre que pudiera escapar al bloqueo de los nordistas: por ejemplo, usaron por primera vez en campaña el cañón de tiro rápido de sir Joseph Whitworth (p. 734). Si bien durante los años de guerra llegaron a las costas estadounidenses 800.000 inmigrantes, las invenciones de todas clases destinadas a sustituir a la mano de obra recibieron un impulso enorme, pues el gran tamaño de los ejércitos involucrados, que no tenía precedente, y el alcance del

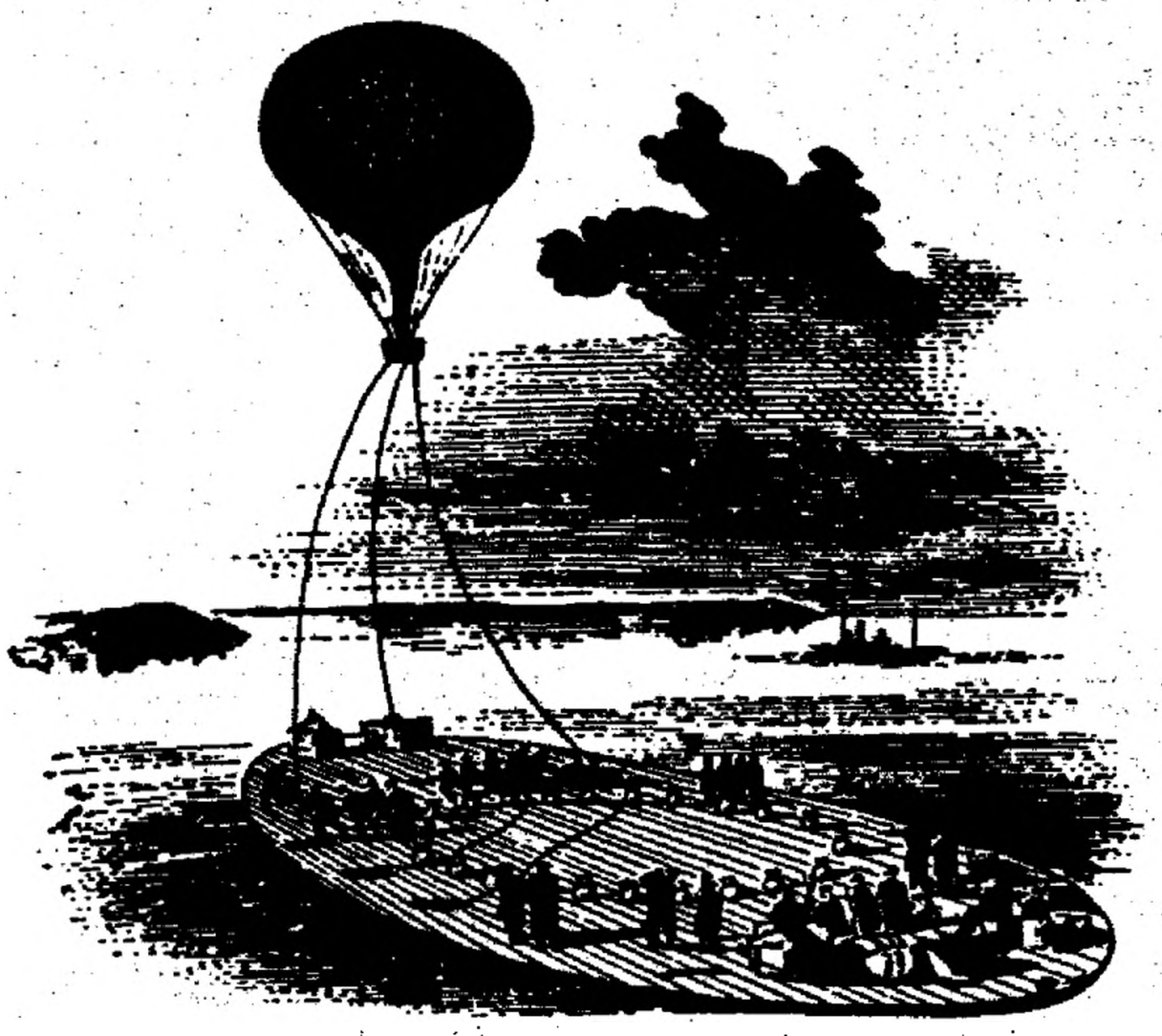


Fig. 139. El primer «portaaviones», empleado para reconocimiento por las fuerzas federales estadounidenses, 1861.

conflicto significaron una demanda de alimentos, uniformes y municiones muy superior a lo que las reducidas reservas de mano de obra podían fabricar con el equipo industrial existente. Por ejemplo, el número de patentes por año, que casi excedía las dos mil, aumentó a más del doble; la máquina de coser, de reciente invención, pudo aplicarse con éxito al cuero; y la producción anual de cosechadoras creció en cuatro años de 20.000 a 70.000. De este modo, cuando finalizó la guerra, las manufacturas del norte, con la inevitable salvedad del algodón, se mecanizaron en un grado mucho más alto que antes y por ello pudieron aprovecharse plena y ventajosamente de las oportunidades creadas por los movimientos inmigratorios de posguerra. El cese de las exportaciones del algodón en rama de los estados sureños, por otro lado, fue acompañado por un descenso del 40 por 100 en la marina mercante, siendo vendidos la mayor parte de los barcos en el extranjero. Mientras que la producción recobraba rápidamente su antigua posición en el mercado mundial, la situación de Estados Unidos como país marítimo fue la única pérdida que no pudo subsanarse después de la contienda por la significativa razón de que a lo largo del siguiente medio siglo los capitales estadounidenses serían ab-

sorbidos en su totalidad por los problemas del desarrollo interno, que alcanzó su primer gran momento culminante, tras la guerra, en los años iniciales de la década de los setenta.

LA EPOCA DEL MATERIALISMO (1871-1900)

Si los observamos retrospectivamente, los últimos treinta años del siglo XIX muestran muchas de las características de las edades de oro: excepto en los Balcanes, Europa se hallaba libre de conflictos armados, y fuera de este continente, las únicas campañas de envergadura eran las emprendidas por Chile contra Perú y Bolivia, los breves conflictos chino-japonés e hispano-americano y la guerra de Gran Bretaña en Sudáfrica. Esta situación era la más notable, pues casi todo el continente africano, una parte considerable de Asia e incluso las islas del océano Pacífico estaban siendo anexionadas rápidamente por las naciones europeas, que habían creado imperios rivales. Que éstos no combatieran entre sí por el botín debe atribuirse al hecho de que, en general, había suficiente para todos los que fuesen llegando. El hecho de que estas guerras, emprendidas contra la resistencia de los pueblos autóctonos, fueran en conjunto de escasa importancia se debe fundamentalmente al progreso tecnológico, como lo muestra un solo ejemplo: en la batalla de Omdurmán, que duró cuatro horas y media, en 1898, Kitchener luchó contra un enemigo valeroso y desesperado que contaba con el doble de hombres; y aun así conquistó el Sudán con una pérdida de sólo cuarenta y ocho hombres, mientras que en el campo contrario se contaron unos 11.000 cadáveres de derviches: Kitchener tenía a su disposición cuarenta y cuatro piezas de artillería de campaña, veinte ametralladoras Maxim y una flotilla de cañoneros que disparaban un explosivo de alta potencia, el ácido pícrico o *lyddite*, que nunca se había visto en acción anteriormente. Pero fue tam-

bién un período de penetración pacífica en regiones que hasta entonces habían permanecido casi deshabitadas. Más de un millón de europeos entraron en Estados Unidos cada año, otros millones más fueron a Canadá, Oceanía y Sudamérica, y la década de los noventa fue testigo del comienzo de la expansión rusa por Asia central y el Oriente Lejano.

Este movimiento significó, en cierto sentido, la conquista del mundo por una tecnología perfectamente acabada para entonces. El primer ferrocarril transcontinental americano se completó en 1869, año de la apertura del canal de Suez. Hacia 1900 el ferrocarril había cuadruplicado, en términos mundiales, su red en el transcurso de una sola generación con el fin de unir las grandes zonas continentales (salvo el interior de China) con los numerosos puertos, en los que se utilizaban buques de vapor, a los cuales el canal de Suez proporcionó una ventaja importante sobre los veleros. El consumo mundial de carbón se incrementó casi tan rápidamente como el kilometraje de vías férreas, mientras que la sustitución del hierro por el acero como material básico para la construcción de máquinas, barcos y, finalmente, edificios contribuyó enormemente a la durabilidad de los bienes de la industria pesada, que el hombre ya producía en cantidades cada vez mayores. Pero para las mentes reflexivas, al menos, el prodigio de los logros de su tiempo quedaba realzado en gran medida por el surgimiento de nuevas técnicas: los grandes avances en la electricidad y en la industria química, por ejemplo, y la introducción del motor de combustión interna, que iba a dar al hombre nuevas comodidades en el transporte, del mismo modo que un transporte en un nuevo elemento.

La época es notable también por la profunda mutación en el equilibrio económico y en las relaciones entre las potencias, mutación que repercutió tan desfavorablemente en Gran Bretaña que es necesario un alejamiento de medio siglo para observarla desde un punto de vista filosófico. El aparatoso progreso de

Estados Unidos, con sus inmensos recursos naturales, era algo inevitable. Los éxitos alemanes, a una escala mucho menor, fueron facilitados al menos por el hecho cierto de que Gran Bretaña había sido durante largo tiempo el taller del mundo, y por ello tropezaba ahora con el obstáculo de un equipamiento demasiado valioso y de unas técnicas que se tornaban anticuadas rápidamente. Actualmente puede aceptarse, ya que en Europa el liderazgo tecnológico iba a pertenecer, finalmente, a la potencia que pudiese competir en igualdad de condiciones con los recursos estadounidenses, es decir, Rusia. En 1900 este país producía la mitad del petróleo mundial y había causado un gran impacto en el mercado europeo del trigo, pero, salvo en regiones fronterizas como Finlandia y Polonia, su industria manufacturera se hallaba aún en su infancia. Para las demás potencias, sin embargo, el crecimiento de la minería del carbón expresa claramente el cambio de su posición relativa. En 1870 Gran Bretaña extraía un 50 por ciento más de carbón que Estados Unidos, Alemania y Francia juntas; en 1900 éstas extraían un 70 por ciento más que Gran Bretaña. En tanto que la producción británica se había duplicado tan sólo, la estadounidense se había multiplicado por ocho, la alemana por cuatro y la francesa por dos y medio.

La repugnancia natural por aceptar el dominio británico sobre la economía durante más tiempo del necesario puede ser una razón que explique la vuelta general hacia regímenes de tarifas aduaneras altas, si bien las rivalidades continentales, que impulsaban no sólo la carrera de armamentos, sino también un especial culto a la autarquía agrícola con vistas a una probable guerra, desempeñaron a su vez un papel de importancia. Entre las potencias europeas sobresalía Alemania en 1879: pero las demás no se resignaban a seguir la política de Bismarck, el cual estableció un cuidadoso equilibrio entre los intereses encontrados de los industriales y los terratenientes. Pasado un cuarto de siglo, los derechos de importa-

ción sobre las manufacturas británicas ascendían a una media del 25 por 100 en Alemania, un 27 por 100 en Italia, un 34 por 100 en Francia, un 35 por 100 en Austria-Hungría y un 131 por 100 en Rusia. La cifra correspondiente a Estados Unidos, donde las tarifas aduaneras comenzaron a elevarse en los años de la guerra civil, era de un 73 por 100: el mercado transatlántico para las mercaderías británicas, sin embargo, estaba muy lejos de compensar los trastornos surgidos entre terratenientes y granjeros a causa de la baratura del trigo norteamericano, que después de 1870 había comenzado a fluir en dirección opuesta. Al iniciarse el nuevo siglo la campaña de reforma arancelaria de Joseph Chamberlain basaba su programa reivindicativo en el nuevo sentimiento de inseguridad económica existente entonces en Gran Bretaña, pero el fuerte imperialismo de la época comprendida entre dos de los aniversarios de la reina Victoria, el de 1887 y el de 1897, fue debido en parte a una creciente conciencia de que solamente por medio de una política decidida podrían los británicos defender la posición de preponderancia económica que tiempo atrás se había considerado inexpugnable.

Desde 1860, aproximadamente, los capitalistas británicos habían dejado de invertir cantidades grandes en la Europa continental. Existían muchas posibilidades de inversión en la India, después de su reorganización tras la rebelión de 1857, y era de suponer, asimismo, que los demás intereses imperiales, alentados por Disraeli desde 1874, y que seguirían creciendo hasta la época de la guerra anglo-boer de 1899, iban a evidenciar una alternativa provechosa. Pero el hecho es que, tras treinta años de esfuerzos, el porcentaje del comercio británico con sus colonias había crecido tan sólo de un cuarto a un tercio, mientras que de las importaciones británicas, menos de un cuarto provenían de las colonias. Así, en los años que vieron descender en un tercio el número de trabajadores agrícolas, tanto en Inglaterra como en Ga-

les, de su número inicial de casi un millón en 1871, la emigración fue, en conjunto, un remedio más esperanzador que la perspectiva de verse absorbidos por la industria. En este tiempo el porcentaje británico en la producción industrial mundial estaba disminuyendo, y existen buenas razones para suponer que la tasa anual de aumento de la producción industrial británica disminuía a su vez.

También para Francia éste fue un período de desilusiones, aunque por razones muy diferentes. Su derrota a manos de Alemania no sólo representó un golpe para su orgullo nacional y un paso más hacia la desunión política, sino también el lastre de una indemnización de guerra, que fue saldada con decisión y prontitud, y una seria desorganización industrial por la pérdida de Alsacia y Lorena. Pese a que numerosas empresas se trasladaron a Normandía, en Alsacia hubieron de ser abandonadas industrias textiles y fábricas de maquinaria textil. También se produjo la pérdida de buena parte de los yacimientos de mineta, ricos en hierro, aunque con un alto contenido de fósforo, situados a ambos lados de la nueva frontera, en la región de Longwy; desde 1879 el procedimiento Gilchrist-Thomas (p. 706) permitió que este mineral fuese utilizado en la expansión de la industria alemana del acero. Por añadidura, los alemanes explotaron importantes depósitos de potasa (p. 809) en la Alsacia meridional. Con una población estacionaria, Francia padeció también, y más duramente que Alemania, el peso del servicio militar obligatorio y los gastos de armamento, que sólo le dejaron la alternativa de aceptar pasivamente las pérdidas territoriales. Unicamente en tiempos de los aranceles de Méline, en la última década del siglo XIX, la industria pesada francesa pudo recuperar realmente su fuerza; de todos modos, su predominio en la producción de cierto número de artículos de lujo la mantuvo fuera del estancamiento tecnológico.

Entre tanto los alemanes gozaban de sus éxitos, lo que parecía justificar la fe que Treitschke había ba-

sado en «el Dios que hizo el hierro». Tan sólo en los años ochenta la producción alemana de hierro en lingotes se duplicó prácticamente, en tanto que la británica permanecía casi estacionaria. A finales del decenio el Reino Unido se hallaba aún en cabeza en cuanto a la producción de acero, con más de dos millones de toneladas métricas: diez años más tarde la primacía se basaba tan sólo en un millón y medio de toneladas, pero ahora quien se hallaba en cabeza era Alemania. Alemania no tenía rival en la industria eléctrica, si exceptuamos a Estados Unidos. Y se hallaba también entre los mayores exportadores de colorantes y de productos químicos puros, y aunque sus exportaciones de productos químicos no puros eran bastante menores que las británicas, hacia 1900 estaba ya capacitada para suministrar productos químicos a sus propias industrias y abonar sus tierras a escala gigantesca. De aquí el hecho notable de que en los últimos veinte años del siglo, sin por eso abandonar sus esfuerzos en el campo industrial, Alemania pudo dedicar 800.000 hectáreas más a cultivos alimenticios, entre los que el trigo ocupaba el 10 por ciento. Entre las causas de este progreso tecnológico tan sorprendente se hallaban la estrecha relación entre las universidades y la industria y la enorme amplitud de la enseñanza técnica en todos los campos, desde las veintiocho escuelas agrícolas existentes en 1900 hasta la Escuela Técnica de Charlottenburg, muy reputada en todo el mundo. Apenas iniciado el siglo un periodista británico informaba con asombro de que en Sajonia existía una escuela técnica por cada 10.000 habitantes, y el censo de los empleados en las manufacturas químicas daba un químico universitario por cada cuarenta trabajadores.

El ritmo de la vida estadounidense en este período puede ser ilustrado por el hecho de que la terminación del primer ferrocarril transcontinental, que en 1869 abría paso a la era moderna, pudo llevarse a efecto gracias al trabajo de 20.000 obreros, que colocaban tres kilómetros de raíles al día. Tal dinamis-

mo, relacionado con el espíritu de iniciativa y con el elevado costo de la mano de obra, ayuda a explicar el rápido avance de la tecnología estadounidense. Hasta 1880 la agricultura era todavía la principal fuente de riqueza, pero una agricultura basada en eficaces máquinas cosechadoras para paliar la brevedad de las temporadas de recolección en el Medio Oeste, en un nuevo tipo de molino para suministrar agua a las llanuras, y en el nuevo sistema de alambradas de púas para controlar al ganado. Veinte años más tarde los productos industriales doblaban ya a los agrícolas en cuanto a precios, y la producción estadounidense de manufacturas era aproximadamente tres veces mayor que la británica; y en una década el valor de las exportaciones se había casi triplicado. Además, las exportaciones de trigo estaban alcanzando su punto culminante, con un rendimiento por hectárea un 50 por 100 menor del que se obtenía en Gran Bretaña, Alemania y Holanda. Aunque las asociaciones para concesiones territoriales empeñadas en promocionar «la agricultura y las artes mecánicas» datan de 1862, y de 1865 el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), el acercamiento científico a los problemas de la explotación agrícola e industrial se hallaba tan sólo en sus comienzos: con todo, Estados Unidos había alcanzado el primer puesto gracias al desarrollo de técnicas que ayudaban a explotar sus abundantes recursos naturales con un mínimo de trabajo humano.

En el período de 1873 a 1896 se produjo en todo el mundo una disminución de los precios, lo cual significó, fundamentalmente para países como Gran Bretaña, donde en todo caso existían ya pocas posibilidades para ulteriores avances de envergadura, una depresión del comercio. La situación empeoró, por supuesto, a causa del hundimiento agrícola a que ya hemos aludido. Las inversiones se estancaron y hubo intentos de hallar remedios o alivios mediante cambios monetarios (tales como el bimetalismo estadounidense) y de organizar trusts y cárteles, cu-

yos primeros ejemplos británicos son el trust de la dinamita Nobel, de 1886, y el monopolio del hilo de coser de algodón Coates. Pero la caída de los precios superó la de los salarios, en tanto que el interés creciente del Estado por el bienestar de la clase obrera —por ejemplo, en los sistemas de seguros de la Alemania de Bismarck y en las reformas, postergadas durante largo tiempo, de la administración local en Gran Bretaña— significó a su vez mejoras en la salud y en los esparcimientos. Sin embargo, los períodos de desempleo demasiado prolongados hacían aún estragos en el nivel de vida de los trabajadores, y se estima que en Gran Bretaña existían todavía tantas personas miserablemente pagadas como en los años cuarenta del mismo siglo; pero como la población total se había duplicado en el entretanto, la proporción de pobres, de hecho, se había reducido a la mitad.

Se calcula que el promedio de crecimiento de los salarios reales británicos alcanzó el 100 por 100 en la segunda mitad del siglo XIX: si esta estimación es correcta, los fallos tecnológicos de los últimos años parecen insignificantes en comparación con la magnitud de los logros de la época victoriana. Gran Bretaña había estado a la cabeza en el campo tecnológico, y había sido la iniciadora y organizadora de los cambios sociales correspondientes, lo cual por primera vez en la historia humana hizo que gran número de individuos, al menos en cierta medida, fuesen, no los esclavos, sino los amos de su entorno físico. Así, a la muerte de la reina Victoria, 37 millones de personas vivían en una isla pequeña y no demasiado fértil, y la mayoría de ellas con cierto grado de comodidades. Pero otros iban a superar su ejemplo. En Estados Unidos, con sus inmensos recursos naturales, el nivel de vida era ya más alto que el británico; en la mayoría de los países de la Europa continental era más bajo, pero no tan bajo como en 1870. Las diversas técnicas, de las que vamos a ras-

trear ahora la historia por separado, todavía ofrecían grandes compensaciones a los individuos y a las naciones por una explotación más eficiente de la naturaleza, que habían hecho posible las experiencias —incluidos los errores— de un siglo y medio de vertiginosos cambios.

11. LA MAQUINA DE VAPOR

INTRODUCCION

Como vimos en el capítulo 8, la revolución industrial estaba ya en pleno desarrollo antes de haberse generalizado el uso de la máquina de vapor como fuente mecánica de energía. Hasta entonces sólo se disponía de dos tipos de máquinas —la rueda hidráulica y el molino de viento— como fuentes de energía motriz, y con muy pocas excepciones ninguna de ellas proporcionaba más de 10 cv, y con frecuencia ni siquiera eso. La mayor rueda hidráulica jamás construida fue la «máquina de Marly», montada por orden de Luis XIV en 1682 para alimentar las fuentes de Versalles (p. 63). A pleno rendimiento generaba probablemente unos 75 cv, pero su logro cayó rápidamente en el más completo olvido. A finales del siglo XVIII y durante el XIX aumentó considerablemente la eficacia de las ruedas hidráulicas como consecuencia de los estudios, tanto teóricos como prácticos, llevados a cabo por John Smeaton, a quien sus investigaciones le valieron ser premiado por la Royal Society con la medalla Copley, su más alto galardón. Demostró que la rueda hidráulica que recibía el impulso por su parte superior era teóricamente más eficaz (un 63 por 100) que la que lo recibía por la parte inferior (un 22 por 100), y definió cuáles eran las condiciones en que debía trabajar una rueda hidráulica para conseguir los mejores resultados. Smeaton nunca llegó a experimentar, aunque construyó más de una, con ruedas hidráulicas de costado —en las que el agua golpea a la rueda fuertemente a mitad de su recorrido ascendente—, pero demostró que se les debían aplicar los mismos principios que se aplicaban a las ruedas de impulso superior o inferior.

Smeaton diseñó multitud de ruedas hidráulicas, ninguna de las cuales subsiste hoy debido a que en su construcción se utilizó principalmente madera, pero todavía seguía funcionando, al cabo de ciento sesenta años, un molino levantado en 1776 en la confluencia de los ríos Támesis y Lea para aprovechar la fuerza de la marea. Una de las ruedas con impulso inferior construidas por Smeaton, instalada en uno de los arcos del puente de Londres en 1768, tenía aproximadamente 10 metros de diámetro, 4,5 metros de ancho y 24 paletas; en 1817 sería reemplazada por una rueda de hierro, un ejemplo de cómo en el siglo XIX se empieza a utilizar el hierro como material de construcción. El propio Smeaton experimentaría con el hierro para utilizarlo en ciertas partes de las ruedas hidráulicas, incluyendo el eje y posteriormente los bordes de la rueda, ayudado por la circunstancia de ser ingeniero asesor de una herrería que la compañía Carron poseía cerca de Falkirk. Uno de los numerosos ingenieros influidos por sus trabajos fue Joseph Glynn, quien a lo largo del siglo XIX construyó en Inglaterra buen número de ruedas hidráulicas de grandes dimensiones.

Hacia 1800 no existían todavía máquinas de vapor que desarrollasen más de unos 50 cv, y aunque las máquinas de alta presión construidas en la siguiente década por Trevithick en Inglaterra y por Evans en los Estados Unidos llegaban a generar unos 100 cv, todavía en 1835 la energía media desarrollada por las máquinas de vapor en Inglaterra era de unos 15 cv. En 1876 se exhibió en América una gigante que desarrollaba 2.500 cv; hacia finales del siglo, no obstante, las nuevas centrales eléctricas utilizaban ya máquinas que desarrollaban 10.000 cv (p. 906). El creciente uso por la industria de máquinas de vapor se refleja en el consumo de carbón. Efectivamente, carbón y vapor de agua estaban en muy íntima relación, ya que una de las funciones más importantes que en un primer momento le fueron confiadas a la máquina de vapor fue la de bombear agua fuera de

las minas, mientras que posteriormente el transporte de carbón fue una de las tareas de la locomotora de vapor. En 1700, dos años antes de haberse iniciado la campaña de propaganda del «amigo del minero» de Savery, se extraían en Inglaterra algo así como tres millones de toneladas de carbón anuales. Hacia 1800 la producción había aumentado hasta alcanzar cerca de 10 millones de toneladas y en 1850 la producción alcanzaba los 60 millones, obedeciendo principalmente esta progresión a las necesidades de las máquinas de vapor. Y así, aunque las ruedas hidráulicas y los molinos de viento siguieron conservando su importancia hasta bien avanzado el siglo XIX, este siglo puede ser llamado con toda justicia la era del vapor. Ya en 1824 Sadi Carnot, iniciador francés de la termodinámica, resumía la situación existente en Inglaterra con las siguientes palabras: «Privar a Inglaterra de sus máquinas de vapor sería privarla de su carbón y de su hierro, privarla de sus fuentes de riqueza, arruinar su prosperidad, aniquilar ese poder colosal». Más terminantes aún eran las declaraciones de Huskisson en ese mismo año: «Si la máquina de vapor es el instrumento más poderoso de que dispone hoy el hombre para alterar la faz del mundo físico, al mismo tiempo obra como una poderosa palanca moral para el avance de la gran causa de la civilización».

[INICIADORES DE LA MAQUINA DE VAPOR]

La historia de los primeros pasos de la máquina de vapor nos exige algunas aclaraciones previas sobre los principios en que está basada y en particular sobre la evolución de las ideas referentes a la presión de la atmósfera.

Hasta el mismo siglo XVIII las ideas acerca de la naturaleza de los gases, incluso entre los filósofos de la naturaleza, estaban muy lejos de ser claras, siendo considerados los gases como sustancias misterio-

sas e intangibles. Los filósofos griegos sostenían ya en el siglo VI a.C. que el aire era uno de los cuatro «elementos» de que se suponía estaban formados todos los cuerpos materiales, siendo los otros «elementos» el fuego, la tierra y el agua. El fuego, según Anaxímenes, era una forma enrarecida del aire, y cuando éste se condensaba daba como resultado primero agua y luego tierra. No obstante, este aire no era necesariamente el mismo aire de que está compuesta la atmósfera, sino más bien una concepción filosófica idealizada del mismo. La naturaleza corpórea del aire debió, sin embargo, ser comprendida con toda seguridad ya por los pueblos primitivos, testigos de la fuerza destructora de los vendavales, y por los marineros, que tenían pruebas visibles de su existencia cuando el viento henchía literalmente las velas de sus barcos. Anaxágoras y Empédocles dieron una ulterior prueba directa y experimental de esta naturaleza corporal al demostrar que el agua sólo puede entrar en un barco cuando simultáneamente escapa el aire de él, y demostraron que el aire se diferencia tanto del vacío como de un vapor, por ejemplo el vapor de agua, condensándose este último rápidamente para volver a convertirse en el líquido del que procedía. La «esfera de Eolo» de Herón de Alejandría, en la que un chorro de vapor proyectado sobre una rueda la hacía girar, sirvió como nueva demostración práctica de los efectos tangibles que podían lograrse con el vapor.

Pero incluso en el siglo XVII las ideas acerca de la naturaleza física de la atmósfera eran más cualitativas que cuantitativas. El hecho de que el agua u otros líquidos se precipitasen a llenar un espacio vacío se atribuía al hecho de que «la naturaleza tiene horror del vacío». Y aunque los ingenieros de minas sabían que una bomba aspirante no podía elevar agua por encima de unos nueve metros, todavía no se había encontrado una explicación al porqué de este límite; es más, los urgentes problemas que planteaba la extracción de agua de las galerías de las

minas fueron los que finalmente llevaron a la comprensión de la auténtica naturaleza de la presión atmosférica, y ello, a su vez, sirvió de inspiración para las primeras máquinas de vapor.

Cuando los ingenieros de Cósimo II de Médicis fracasaron en el intento —condenado de antemano al fracaso— de construir una bomba aspirante capaz de extraer agua de una profundidad de unos 15 metros se confió el problema a Galileo, problema que sería finalmente resuelto por su brillante discípulo Torricelli. En 1644 Torricelli enunció que la presión de la atmósfera era igual a la ejercida por una columna de mercurio de unos 760 milímetros de altura aproximadamente: ello corresponde que la presión de la atmósfera sería menor a medida que aumentase la altitud sobre el nivel del mar, verdad comprobada experimentalmente en 1647: la altura de la columna de mercurio de un barómetro llevado a la cumbre de una montaña de Auvernia de 1.465 metros descendió 8 centímetros durante el ascenso. En 1654 Von Guericke, con su famoso experimento de Magdeburgo, hizo una espectacular demostración de la inmensa fuerza que la atmósfera podía ejercer (fig. 140). Mostró que cuando dos hemisferios de 50 centímetros de diámetro *perfectamente ajustados* eran unidos de manera que formasen una esfera y se hacía el vacío en su interior, dos tiros de ocho caballos cada uno no podían separarlos. En efecto, como la atmósfera ejerce una presión de cerca de unos 985 gramos por centímetro cuadrado, se habría necesitado una fuerza de varias toneladas para lograrlo. En otro experimento más inmediatamente relacionado con la historia de la máquina de vapor mostró que cuando se creaba un vacío parcial bajo un émbolo de grandes dimensiones introducido en un cilindro, la fuerza sumada de cincuenta hombres no podía evitar que la presión atmosférica llevase el émbolo al fondo del cilindro.

Tales experimentos dieron vida a la idea de que si se pudiese encontrar algún medio sencillo para crear

Fig. 140. El experimento de Von Guericke para mostrar que dieciséis caballos no podían separar las dos mitades de una esfera en la que había hecho el vacío, 1654.

el vacío repetidas veces se podría utilizar la presión atmosférica como una ventajosa fuente de energía. No obstante, los primeros intentos en este campo no se dirigieron siempre hacia el vapor de agua como medio para crear el vacío. Aunque ésta sería luego reconocida como la solución más práctica, las primeras máquinas de vapor fueron llamadas con bastante frecuencia y propiedad máquinas atmosféricas, puesto que era la presión de la atmósfera la que proporcionaba la fuente motriz. Algunos inventores de la primera época dedicaron su atención al estudio de las posibilidades que ofrecía el uso de la pólvora. En 1680 Huygens, versátil científico holandés, ideó una máquina en la que se hacía explotar pólvora en un cilindro cerrado por un pistón. Cuando se prendía fuego a la pólvora, la mayoría de los gases calientes en que se convertía, junto con parte del aire que originalmente estaba en el interior del cilindro, dilatado por el calor, eran expulsados a través de válvulas de escape. Al enfriarse, las válvulas se cerraban y se creaba un vacío parcial en el interior del

cilindro; una vez frío, el gas ocupaba un espacio mucho menor que cuando estaba caliente, y en consecuencia la presión atmosférica llevaba al pistón hacia el fondo del cilindro. Sin embargo, tal procedimiento tenía dos desventajas fundamentales. La primera consistía en que los residuos de gas en el interior del cilindro eran considerables, de forma que sólo se podía conseguir un vacío parcial; la segunda, que volver a cargar el cilindro con pólvora, esencial para lograr una acción continuada, era no sólo difícil, sino peligroso. Por estas razones el ayudante de Huygens, Denis Papin, dirigió su atención hacia el vapor de agua. En 1690 expuso sus ideas con las siguientes palabras históricas, que constituyen una admirable descripción del modo de actuar de las primeras máquinas de vapor:

> Puesto que el agua goza de la propiedad de que una pequeña cantidad de ella transformada en vapor por medio del calor tiene una fuerza elástica similar a la del aire, y de que por medio del frío se transforma de nuevo en agua, de manera que no queda ni rastro de aquella fuerza elástica, he llegado a la conclusión de que se pueden construir máquinas en cuyo interior, por medio de un calor no demasiado intenso y a bajo costo, se puede producir el vacío perfecto, que de ningún modo se podría conseguir utilizando la pólvora.

Aunque Papin no conocía la relación cuantitativa, un volumen de agua produce 1.300 volúmenes de vapor en su punto de ebullición, de forma que potencialmente se podría conseguir un vacío muy perfecto reconvirtiendo el vapor en agua por medio de la condensación.

Papin puso sus ideas en práctica con una máquina que consistía en un tubo vertical de aproximadamente 63 milímetros de diámetro, cerrado por su parte inferior, que contenía un émbolo con un vástago (fig. 141). Se ponía un poco de agua en el fondo del cilindro, se introducía a continuación el émbolo y se hacía hervir el agua calentando la parte inferior del tubo. El vapor generado hacía subir el émbolo, el cual era sostenido en el punto más alto de su reco-

rrido por medio de un pasador. Se enfriaba entonces el aparato, con lo que el vapor se condensaba para convertirse de nuevo en agua, creando el vacío debajo del émbolo; cuando se quitaba el pasador, el émbolo era empujado hacia el fondo del cilindro por la fuerza de la presión atmosférica. Este dispositivo no tenía importancia práctica, pero estableció el principio vitalmente importante de que se podía utilizar el vapor para mover un émbolo hacia arriba y hacia

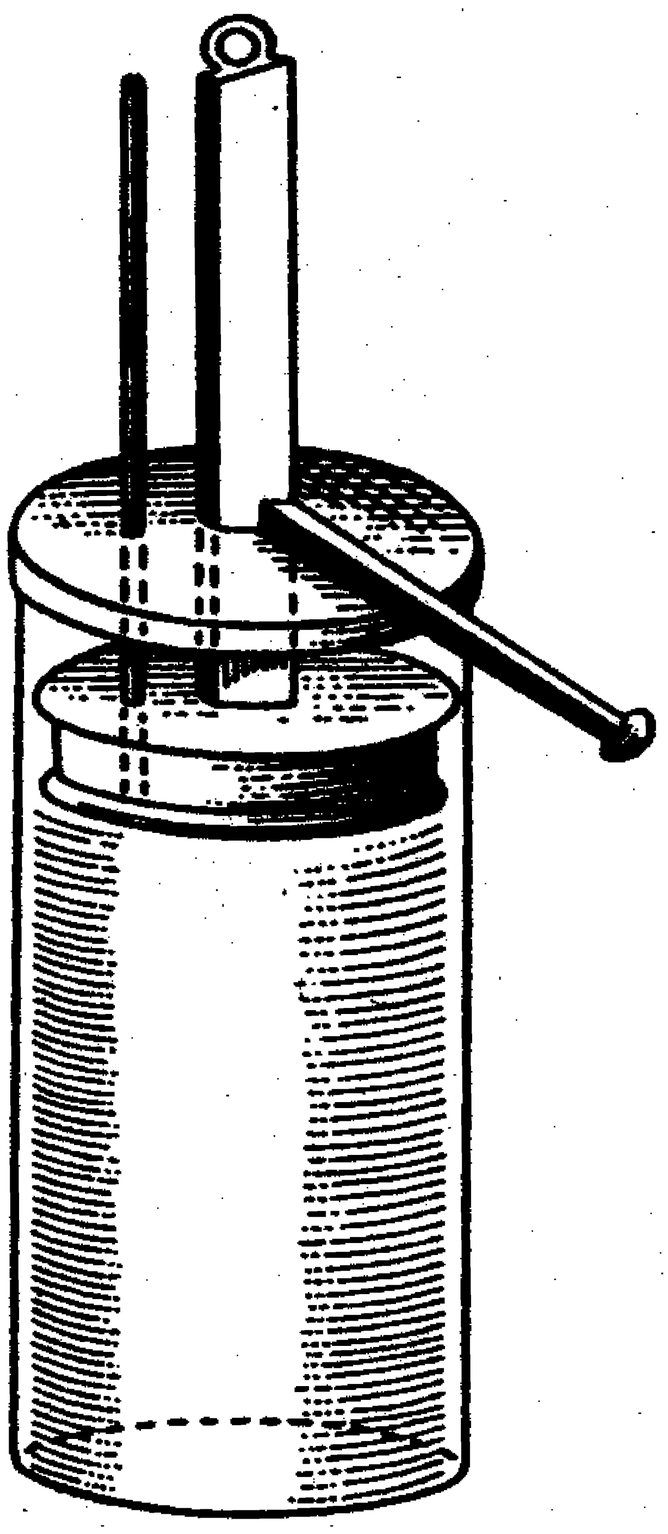


Fig. 141. La máquina de vapor atmosférica de Denis Papin, 1690.

abajo en el interior de un cilindro. Este principio fue rápidamente trasplantado al terreno de la práctica por Savery, Newcomen y Smeaton, a cuyos trabajos debemos dedicar ahora nuestra atención.

De Thomas Savery, que construyó la primera máquina de vapor utilizable, sabemos desdichadamente muy poco; es incluso incierto si su título de «capitán» hacía referencia a una carrera de ingeniero mi-

litar, condición adquirida en las minas de estaño de Cornualles, o a una carrera de marino. Lo que sí se sabe con certeza es que tuvo alguna influencia en la corte, que fue un inventor prolífico y que escribió una serie de opúsculos, entre los que se cuenta uno con el significativo título de *El amigo del minero*, descripción de su «máquina de extraer agua por medio del fuego»: de ahí el nombre de «máquina de fuego» con que también fue conocida. La máquina (fig. 142) fue probada ante Guillermo III en Hampton Court en el verano de 1698, año en que patentó el invento, y ante la Royal Society un año más tarde. Desde su taller situado en Salisbury Court, bocacalle de Fleet Street, hizo una intensa propaganda de la misma, siendo usada durante los primeros años del

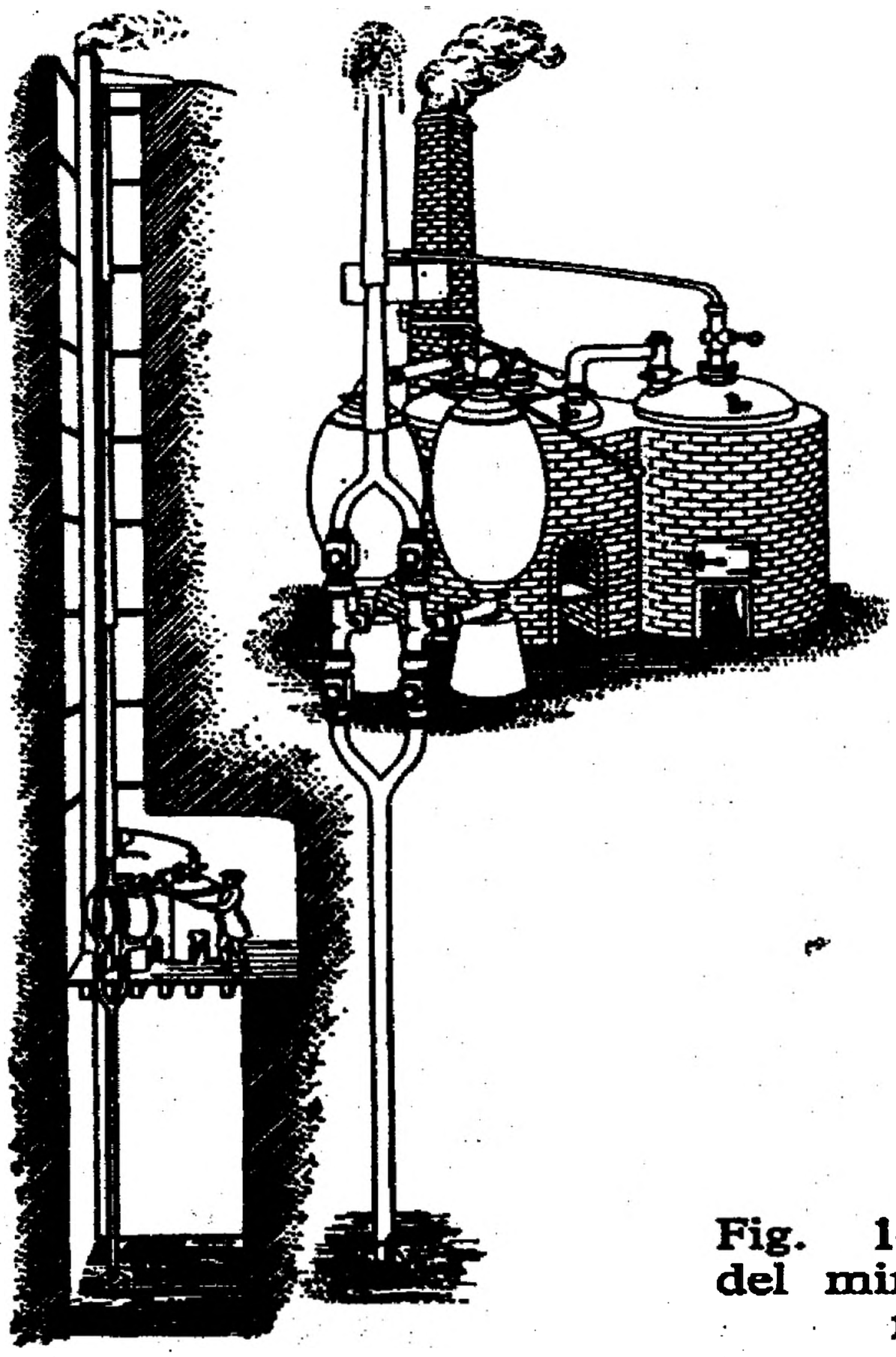


Fig. 142. El «amigo del minero», de Savery, 1699.

siglo XVIII para bombear agua a grandes edificios o a ruedas hidráulicas. Sin embargo, la altura máxima a que podía elevar agua no era suficiente como para permitir su utilización en el drenaje de las minas.

En la bomba de vapor de Savery el vapor procedente de una caldera de forma muy parecida a una antigua olla de cocina era conducido a través de un tubo, provisto de una válvula, a un recipiente de forma oval lleno de agua, agua que era expulsada hacia arriba por la irrupción del vapor a través de un segundo tubo. Cuando el recipiente oval estaba lleno de vapor, éste era condensado bañando el exterior del recipiente con agua fría, con lo que se creaba un vacío parcial; de manera que cuando el recipiente era conectado por medio de otro tubo con el agua que estaba situada a un nivel inferior, la presión atmosférica hacía subir el agua, llenando el citado recipiente oval. Tenía dos recipientes que se llenaban y se vaciaban alternativamente, siendo controlado el ciclo total de las operaciones por medio de válvulas convenientemente distribuidas.

En un intento de aumentar la altura a que su máquina podía hacer subir agua, Savery utilizó vapor a alta presión, pero esta solución presentaba problemas de construcción que por entonces no podían ser resueltos de forma satisfactoria. Tendría que pasar todavía cerca de una centuria antes de que las máquinas de vapor a alta presión pasasen a ser de uso común. Para comprender la forma de operar de las máquinas de vapor a alta presión deben hacerse unas aclaraciones sobre la relación existente entre el vapor de agua y la propia agua. Cuando se calienta agua aumenta la presión de su vapor y rompe a hervir cuando la presión del vapor es igual a la presión exterior: en un recipiente abierto y al nivel del mar la ebullición empieza a los 100° C. Si se reduce la presión ejercida sobre el agua, ésta entrará en ebullición a una temperatura inferior: una consecuencia práctica de lo que acabamos de decir es que a una gran altitud no se puede cocer bien un huevo, ya que

el agua no llega a alcanzar la temperatura necesaria para coagular la clara del mismo. A la inversa, si se aumenta la presión sobre el agua limitando, por ejemplo, el escape de vapor por medio de una válvula, la ebullición empieza a una temperatura superior. Este es el principio en que se basa la familiar olla a presión inventada por Papin; el mismo principio se utiliza para la esterilización del instrumental quirúrgico, que requiere una temperatura superior a los 100° C. De igual forma se pueden obtener grandes presiones calentando agua a altas temperaturas. Así, a 200° C la presión del vapor es quince veces mayor que a 100° C. El vapor originado a 100° C tiene, como ya hemos dicho, una presión igual a la de la atmósfera al nivel del mar, y por tanto puede elevar agua hasta una altura máxima de sólo nueve metros. No obstante, el vapor generado a una temperatura de 200° C podría, al menos en potencia, elevar agua a una altura quince veces superior, esto es, a 135 metros. Fue esto lo que indujo a Savery a intentar utilizar en su máquina vapor a una presión entre 8 y 10 atmósferas, con lo que se obtendría la posibilidad de elevar agua a unos 90 metros.

Es tentador suponer que Thomas Newcomen, ferretero y herrero de Dartford, contemporáneo de Savery y natural, como éste, de Devon, basó su máquina, que en 1712 estaba ya en funcionamiento, en la obra llevada a cabo por Savery una década antes poco más o menos. No obstante, todos los indicios de que disponemos muestran que Newcomen realizó su invento con bastante independencia de Savery, y que la razón por la que finalmente se asoció con él fue que la patente de Savery estaba redactada en unos términos tan amplios que cerraba el camino a la utilización de casi cualquier otra nueva invención en este terreno. Newcomen adoptó de hecho el cilindro y el pistón propuestos por Papin, de los que posiblemente tenía noticias directas, puesto que de este aspecto no se hablaba en *El amigo del minero*. A diferencia de Savery, Newcomen nunca se propuso

utilizar vapor a alta presión, lo que hizo que su máquina, al moverse sólo por la presión atmosférica, fuese mucho más fácil de construir. El éxito de Newcomen puede atribuirse a muchos factores, entre ellos su directa experiencia en los problemas de drenaje, adquirida en las minas de estaño de Cornualles; la habilidad de su ayudante Calley, un fontanero, y sus métodos de construcción, que, aunque muy primarios, se situaban perfectamente dentro de los límites impuestos por la artesanía de la época.

La caldera de Newcomen producía vapor a presión atmosférica. Cuando el vapor se introducía por la parte inferior del cilindro, el propio peso del vástago del segundo pistón, que colgaba del otro extremo del balancín, hacía subir al primer pistón. Cuando el cilindro estaba lleno de vapor y su entrada cerrada por medio de una válvula, se introducía en él un chorro de agua fría para condensar el vapor a través de una llave de inyección —dispositivo que J. T. Desaguliers había utilizado para aumentar la eficacia de la máquina de Savery— y en consecuencia el pistón era empujado de nuevo al fondo del cilindro por la presión atmosférica. Al tiempo que el peso del vástago de un pistón hacía descender un extremo del balancín, el otro extremo se levantaba, arrastrando consigo el vástago del otro pistón, el cual aspiraba el agua. Para lograr la continuidad del ciclo, la válvula del vapor y la llave de inyección de agua fría se abrían y cerraban automáticamente por medio del movimiento de la bomba de inyección (que suministraba el agua fría necesaria para condensar el vapor), la cual, a su vez, estaba unida al balancín. Una muestra del ingenio de Newcomen, así como de la imposibilidad en aquel entonces de asegurar la apropiada manufactura de máquinas de tal tamaño, es que para ajustar el pistón a los bordes del cilindro y evitar de esta forma la entrada y salida de aire, lo que hizo fue cubrir el pistón con un disco de cuero flexible y mantenerlo hermético cubriéndolo con una capa de agua.

Así era la máquina que Newcomen, en asociación con Savery, montó para las minas de carbón de Dudley Castle, Worcestershire, en 1712 (fig. 143). El balancín hacía doce movimientos por minuto, cada uno de los cuales extraía aproximadamente 45 litros de

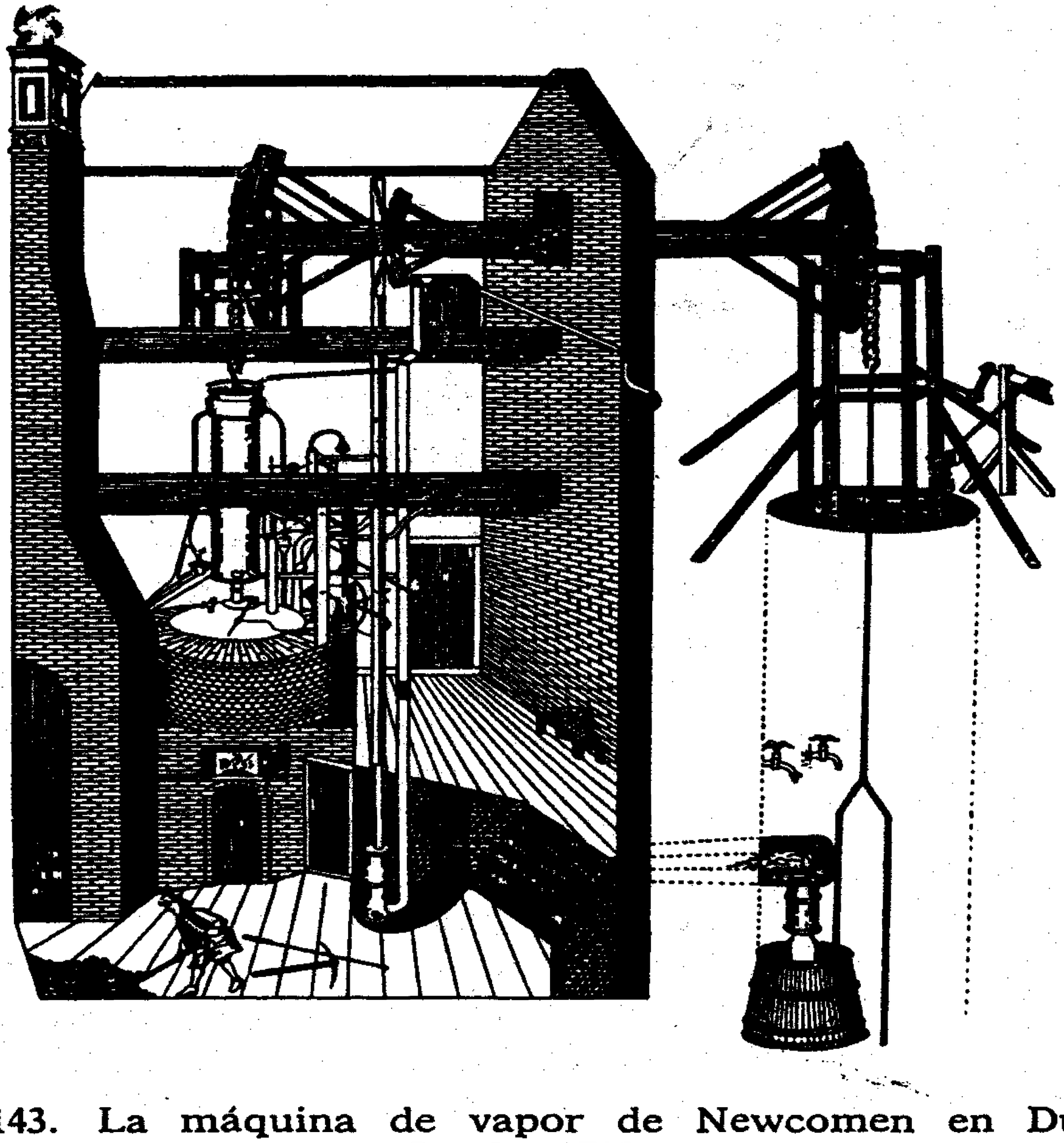


Fig. 143. La máquina de vapor de Newcomen en Dudley Castle, 1712.

agua de una profundidad de unos 46 metros por medio de una serie de bombas de extracción escalonadas, lo que equivale a unos 5,5 cv frente a uno del *Amigo del minero* original. Su eficacia, no obstante, estaba limitada por el hecho de que a principios del siglo XVIII era imposible asegurar que el interior de un cilindro iba a ser perfecto, como se necesitaba

que fuese en los cañones y en las bombas de agua, si pasaban de 18 centímetros de diámetro. Las máquinas de Newcomen requerían dimensiones aún mayores: así, el cilindro de una máquina montada en Edmonston, Midlothian, en 1725 tenía un diámetro de unos 74 centímetros y una carrera de unos 3 metros, y otro que funcionaba en Newcastle en 1765 tenía un diámetro de 188 centímetros y una altura de 3,2 metros aproximadamente. Aun a pesar de ello, la invención se extendió a ocho países sólo durante los primeros cuatro años, y antes de la muerte de su inventor, en 1729, se usaba ya en Hungría, Francia, Bélgica, Alemania, Austria y Suecia. Un cuarto de siglo más tarde había llegado inclusive a las colonias de América, habiéndose enviado la primera, con piezas de repuesto por duplicado e incluso algunas por triplicado, para su instalación en una mina de cobre en Newark, New Jersey. Su mayor impacto, no obstante, lo logró en Inglaterra, donde se sabe que se construyeron por lo menos dos por año a lo largo de dos tercios de siglo. Atendió las apremiantes necesidades de los vecinos de Newcomen en la industria del estaño de Cornualles; cambió la suerte de las profundas minas de carbón del norte de Inglaterra, seriamente deterioradas por las inundaciones; bombeó agua para abastecer a las ciudades, y alimentó las ruedas hidráulicas en las llanuras de la región industrial de Midlands.

En 1767 Smeaton comenzó un estudio científico sobre el rendimiento de una máquina de vapor, medido en términos de la cantidad de agua que podía levantar a 0,3 metros de altura por cada *bushel* (36,3 decímetros cúbicos) de carbón quemado. Esto hacía posible comparar la eficacia de una máquina con otra y medir las consecuencias de las modificaciones introducidas en las máquinas. Descubrió que el rendimiento medio era entonces de aproximadamente 4 millones de metros por kilogramo, y con la ayuda de una máquina especial para barrenar cilindros, construida en las herrerías de Carron, procedió

a diseñar un cierto número de máquinas mucho más eficaces con cilindros de gran tamaño. En 1774 había logrado doblar el rendimiento, y una de sus grandes máquinas fue enviada a un lugar tan remoto como Kronstadt, en Rusia, donde se utilizó para vaciar los diques en la base naval de Catalina la Grande. Pero, aun en este caso, la «máquina de fuego» sólo aprovechaba en su funcionamiento un 1 por 100 del calor generado por el combustible empleado, nivel tolerable principalmente porque quienes más la usaban eran los propietarios de las minas de carbón que las hacían funcionar a base de carbón de baja calidad sin valor en el mercado. Sin embargo, quizá se pueda juzgar mejor su resultado si se tiene en cuenta que la última superviviente de estas máquinas, una instalada en Parkgate, Yorkshire, fue desmantelada en 1934 tras haber funcionado durante más de un siglo sin haber sufrido nunca ninguna avería grave.

El movimiento ascendente y descendente de la máquina de Newcomen era muy apropiado para poner en movimiento bombas de agua. Y si era necesario conseguir un movimiento circular —por ejemplo, para sacar material del interior de las minas— podía ser usada para bombear agua a un depósito que a su vez alimentase a una rueda hidráulica. Esta última proporcionaba un movimiento uniforme, tal y como lo requerían las máquinas de hilar algodón.

WATT Y TREVITHICK

A la edad de veintiún años James Watt abandonaba su oficio de fabricante de instrumentos matemáticos, oficio que había aprendido en Londres tras haber abandonado su ciudad natal, Greenock, para entrar al servicio de la Universidad de Glasgow, debido a que su condición de aprendiz le impedía establecerse por su cuenta en cualquier parte de la ciudad. Consecuencia natural de ello sería su nuevo interés por los problemas tanto teóricos como prác-

ticos, lo que le permitiría dar el paso histórico entre las máquinas atmosféricas y las máquinas de vapor. El rendimiento poco satisfactorio de un modelo de la máquina de Newcomen que la Universidad había enviado previamente, sin ningún éxito, a un fabricante de instrumentos de Londres para que la reparase proporcionó a Watt su punto de partida. Se dio cuenta inmediatamente de que la causa principal del mal funcionamiento de la máquina era el hecho de tener que enfriar el cilindro, con objeto de condensar el vapor, entre movimiento y movimiento del pistón: si se pudiese mantener el cilindro siempre caliente se podía esperar una gran mejora de su rendimiento. A pesar de todo, aún fueron necesarios meses de meditación antes de aquel histórico paseo dominical por Glasgow Green, cuando se le ocurrió la idea, como contaría más tarde, «de que al ser el vapor un cuerpo elástico se precipitaría a ocupar cualquier vacío, y que si se establecía una comunicación entre el cilindro y un recipiente en cuyo interior se hubiese hecho el vacío, el vapor pasaría del cilindro a este recipiente, en donde se podría condensar sin necesidad de enfriar el cilindro».

Fue en mayo de 1765 cuando Watt formuló la idea de un condensador separado, habiendo sido registrada la patente de este «nuevo método para reducir el consumo de vapor y combustible en las máquinas de fuego» en enero de 1769. Con todo, las dos primeras máquinas de Watt no entraron en funcionamiento hasta 1776, año de la Declaración de Independencia de los Estados Unidos y de la publicación del libro de Adam Smith *La riqueza de las naciones*. En la figura 144 se muestra una máquina construida el año siguiente. La tardanza en la realización no quería decir ausencia de demanda. La mayoría de las máquinas construidas por Newcomen entonces en uso eran tan ineficaces como lo había sido su prototipo dos generaciones antes: las minas de estaño de Cornualles no habrían podido costearlas a no ser por la condonación de un impuesto sobre el carbón. Por

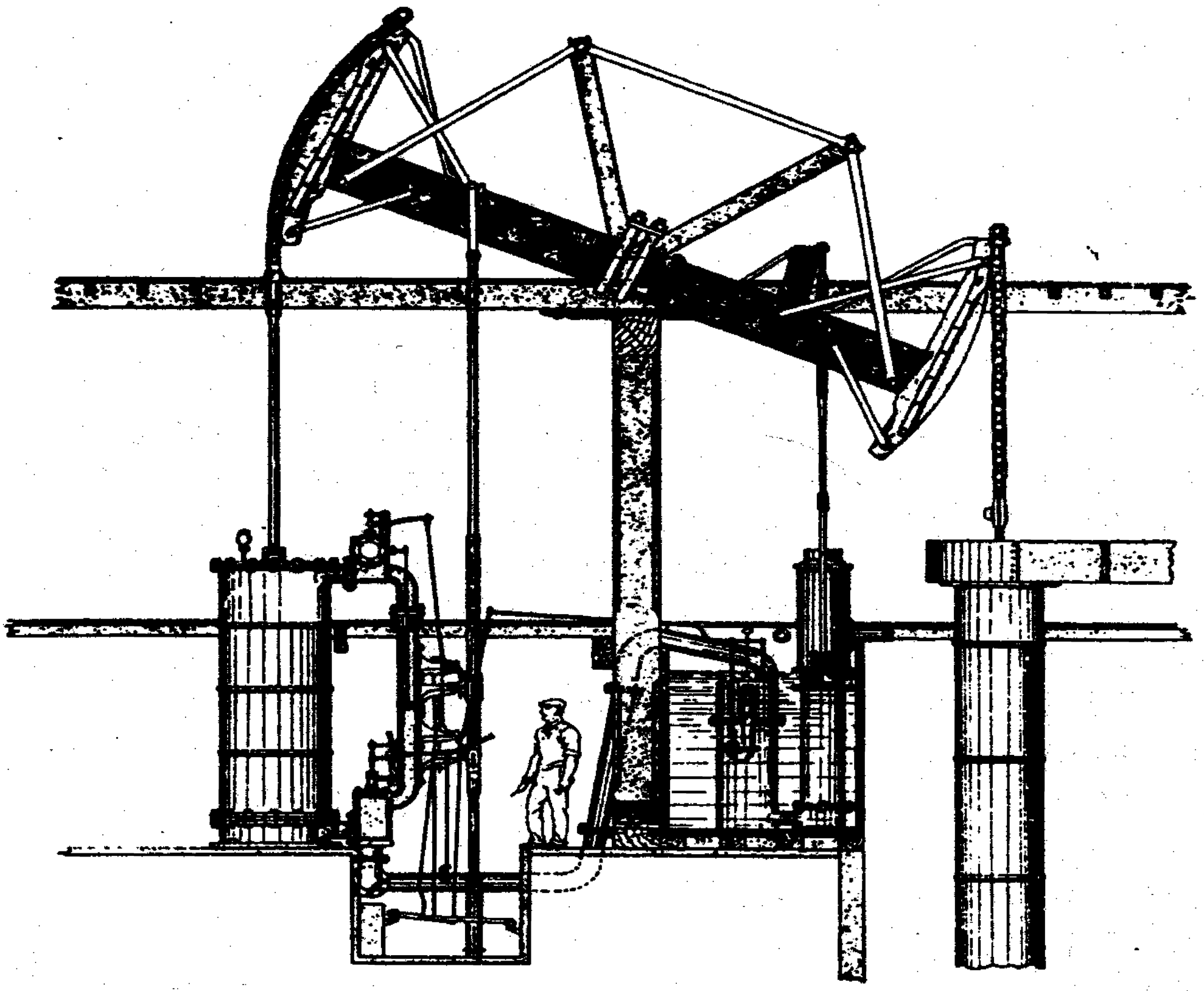


Fig. 144. Primitiva máquina de bombeo de Boulton y Watt, construida en 1777. Se sabe que esta máquina funcionó durante ciento veinticinco años.

otro lado, la industria del hierro, en rápida expansión, era una de las muchas en que, a finales del siglo XVIII, se habían dado las condiciones favorables necesarias para la introducción de una nueva fuente de energía, caso de que hubiera sido posible encontrarla. Pero Watt tenía que hacer frente a enormes dificultades, tales como las relacionadas con la obtención de una mano de obra especializada, material y herramientas para ejecutar sus diseños, y el soporte financiero para hacer de su invento un éxito comercial.

Respecto a su construcción, la mayor dificultad, ya aludida, estribaba en barrenar un cilindro suficientemente perfecto para que no permitiera ningún escape de vapor entre sus paredes y los bordes del

pistón. El ardid de Newcomen para impedir los escapes de vapor, a base de cerrar herméticamente el pistón con agua fría, no servía al propósito de Watt de mantener el cilindro tan caliente como fuese posible. La magnitud de las dificultades de construcción son puestas en evidencia por el hecho de que Smeaton, ingeniero con tanta experiencia y de ideas tan avanzadas como ningún otro en su época, emitiese la opinión muy digna de ser tenida en cuenta de que «no existían ni herramientas ni hombres que pudiesen fabricar máquina tan compleja con la suficiente precisión». Los constructores de molinos eran entonces los únicos trabajadores equiparables a un mecánico experto, y la construcción de máquinas debía ser encomendada al esfuerzo combinado de herreros, torneros y carpinteros. Cuando llegó el momento de construir las máquinas proyectadas por Watt, éstas fueron fabricadas normalmente con materiales y mano de obra locales; Watt proporcionaba únicamente los planos, un especialista que dirigiese los trabajos y algunas partes concretas de la máquina, como por ejemplo las válvulas. Un avance definitivo lo constituyó el invento por John Wilkinson en 1774 de un nuevo tipo de máquina para barrenar cilindros (página 509), diseñada para cañones pero capaz de servir, con ciertas modificaciones, para barrenar cilindros de tamaño considerable destinados a otros propósitos. Una de las dos primeras máquinas de Watt, a las que ya antes hemos hecho referencia, fue diseñada para inyectar aire en uno de los altos hornos de Wilkinson; éste a cambio fabricó los cilindros de muchas de las primeras máquinas de Watt.

Por lo que se refiere a los problemas financieros que planteaba la explotación del invento de Watt, la quiebra del primer socio de éste, John Roebuck, de las herrerías de Carron, inventor también muy emprendedor, nos recuerda la incertidumbre que se cernía sobre cualquier aventura comercial en aquella época que fluctuaba en muy cortos intervalos de tiempo entre la guerra y la paz. Los problemas monetarios

llevaron a Watt a aceptar durante algún tiempo la seguridad que le ofrecía un puesto de ingeniero civil. Este puesto le llevó a Londres, donde amigos suyos le presentaron a Matthew Boulton, un industrial de primera categoría que tenía fábricas en Soho, cerca de Birmingham. La ya clásica colaboración que se siguió entre Boulton y Watt, poniendo aquél la experiencia y el prestigio de las fábricas de Soho al servicio del nuevo invento, quizá ganó con la dilación. Cuando Watt llevó su modelo experimental a Birmingham en 1774, a su patente le quedaban ya sólo ocho años de validez, tiempo que en opinión de Boulton era demasiado corto para obtener beneficios con su manufactura. En consecuencia, Watt hizo una petición al Parlamento para que se ampliase el tiempo de validez de su patente, lo que se le concedió en 1775; esta prórroga le protegía hasta 1800, y así la importantísima colaboración entre Boulton y Watt se extendería a lo largo de todo el último cuarto del siglo XVIII.

La firma construyó 496 máquinas en total, de las cuales 164 sirvieron como bombas de agua, complementando el trabajo de las máquinas de Newcomen, 24 fueron empleadas en altos hornos y las restantes 308 sirvieron directamente para suministrar energía motriz a otras maquinarias, aunque hasta 1795 Lancashire y sus fábricas no empezaron a tener mayor importancia en la producción total del país que Staffordshire. Esta última aplicación implicaba el diseño de un mecanismo que permitiese obtener un movimiento rotatorio uniforme; este mecanismo será descrito posteriormente.

El condensador independiente fue la innovación más importante de la máquina de Watt, pero como también introdujo otros varios perfeccionamientos, lo mejor será hacer una descripción de la máquina en su forma más plenamente evolucionada, tal y como era fabricada en 1788. Lo primero y más importante era que el cilindro se mantenía a una temperatura elevada por medio de un baño de vapor, y

existía un condensador independiente, vaciado por medio de una bomba de aire. Cuando el pistón alcanzaba el punto más elevado de su recorrido, la válvula de escape se abría y simultáneamente se hacía entrar vapor por medio de otra válvula de admisión en el espacio comprendido entre el pistón y la parte superior del cilindro; la presión del vapor y la presión atmosférica combinadas hacían descender el pistón. Cuando el pistón alcanzaba el punto inferior de su recorrido, las dos válvulas anteriores —la de admisión y la de escape— se cerraban, y se abría una válvula de equilibrio; todo ello servía para igualar la presión a ambos lados del pistón, que era entonces llevado de nuevo a la parte más alta de su recorrido por el peso del vástago de la bomba de agua.

La innovación de la máquina de doble efecto, que la hacía doblemente potente por medio de la inyección alternativa de vapor a cada lado del pistón, llevó a Watt en 1782 a inventar lo que él consideraba como su más elegante dispositivo, el mecanismo del «paralelogramo articulado». El problema que había que resolver era el de transmitir el impulso del pistón, en su camino hacia arriba, al balancín: la cadena que hacía descender al balancín en la máquina de simple efecto no servía para este propósito, ya que era necesaria una conexión rígida para empujar el balancín hacia arriba, y no se podía unir directamente el balancín al pistón, dado que mientras el segundo se movía siempre en línea recta, el extremo del balancín describía un arco. El paralelogramo articulado, usado durante más de un siglo, resolvió totalmente esta dificultad. La segunda mejora más importante de las introducidas por Watt fue la de usar la fuerza expansiva del vapor, cortando su entrada al poco de haber iniciado su recorrido el pistón y dejando que el resto del trabajo lo hiciese su fuerza de expansión.

Estos y otros perfeccionamientos, tal y como un regulador para gobernar la entrada de vapor y man-

tener así a la máquina funcionando a una velocidad regular, triplicaron el rendimiento de las bombas de agua en comparación con las fabricadas por Smeaton. Pero como el invento conquistaría el campo de la industria en general sería como máquina capaz de producir un movimiento rotativo. Imposibilitado para usar una manivela a causa de la patente hecha por un rival, Watt desarrolló el engranaje planetario, así llamado porque la rueda planetaria, unida al extremo del vástago del pistón, se movía alrededor del perímetro del piñón central, unido éste al extremo del balancín. Una máquina de este tipo con una potencia de 10 cv sería construida por Boulton y Watt a partir de 1784 para servir a los más variados usos.

Una de las mayores ventajas de la máquina de balancín consistía en que su construcción y montaje no presentaban grandes dificultades. Tenía muy pocas superficies planas, superficies que hasta la invención en 1820 de una máquina acepilladora tenían que ser realizadas a mano, de forma muy laboriosa, y funcionaba aunque hubiese considerables desajustes en su montaje. Comparadas con estas ventajas, las desventajas de su tamaño y pesadez tenían relativamente poca importancia.

Sin embargo, la expiración de la patente de Watt sobre su condensador en 1800, fecha en que también abandonaría sus actividades, dejaría campo abierto a las investigaciones de otras personas, y especialmente a aquellas investigaciones referentes a la utilización de vapor a alta presión, que Watt había considerado demasiado peligrosa y difícil, aunque ya en 1725 Jacob Leupold de Leipzig hubiese publicado la descripción de una máquina que funcionaba con vapor a alta presión. Es significativo que un fabricante de ruedas de Delaware, Oliver Evans, introdujese la idea en el Nuevo Mundo —donde en fecha tan tardía como 1803 no había más de media docena de máquinas de vapor— al mismo tiempo que los más conocidos experimentos ingleses en la materia. En 1804 Evans estaba ya pulverizando yeso y cortando már-

mol en Filadelfia con una máquina muy pequeña —el recorrido del pistón era sólo de unos 20 centímetros— que trabajaba con vapor a una presión de unos 3,5 kilogramos por centímetro cuadrado. Dos años antes, Richard Trevithick, ingeniero de las minas de Cornualles, había construido en Coalbrookdale una máquina de bombeo de pequeño tamaño pero de gran potencia, con una caldera de hierro colado cuyas paredes medían unos 38 milímetros de grueso, que lograba una presión de 10 kilogramos por centímetro cuadrado, diez veces la presión de la atmósfera (fig. 145). Una característica notable de esta máquina era que a pesar de su potencia el cilindro tenía sólo unos 18 centímetros de diámetro y una altura de 0,9 metros. En 1800 había construido una máquina de doble efecto y alta presión para extraer mineral en Cornualles, y había construido también un carruaje movido por vapor que podía llevar a varias personas. En la fig. 146 se puede ver una máquina fija de alta presión construida por Trevithick en 1802. En 1804 construyó la primera máquina locomotora para ferrocarril que funcionó con éxito, máquina que será descrita posteriormente. Su interés por la locomoción a vapor, no obstante, no se interfirió en el desarrollo de las máquinas fijas, de las que

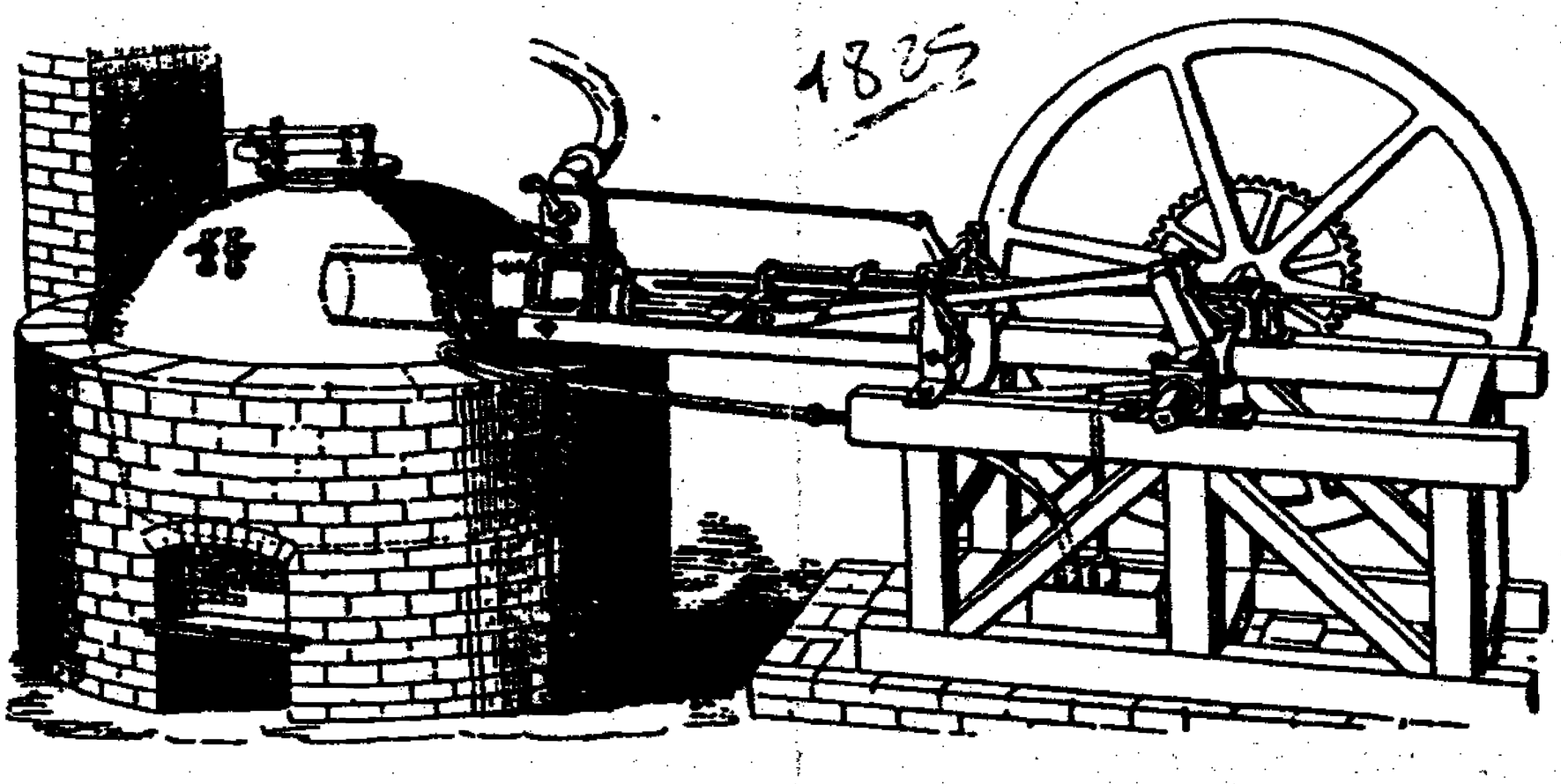


Fig. 145. La máquina de alta presión de Trevithick

en 1804 había construido cerca de cincuenta. Muy pronto su «máquina de Cornualles» no tendría rival y seguiría usándose hasta finales del siglo no sólo para realizar trabajos de bombeo, sino también para atender a otra gran cantidad de necesidades de la industria, entre las que se incluía la laminación de hierro, la molienda de cereales y la fabricación de azúcar. Un factor importante en su desarrollo lo constituyó el hecho de que a partir de 1811 los propietarios de minas de Cornualles publicasen informes regulares sobre el rendimiento de sus máquinas

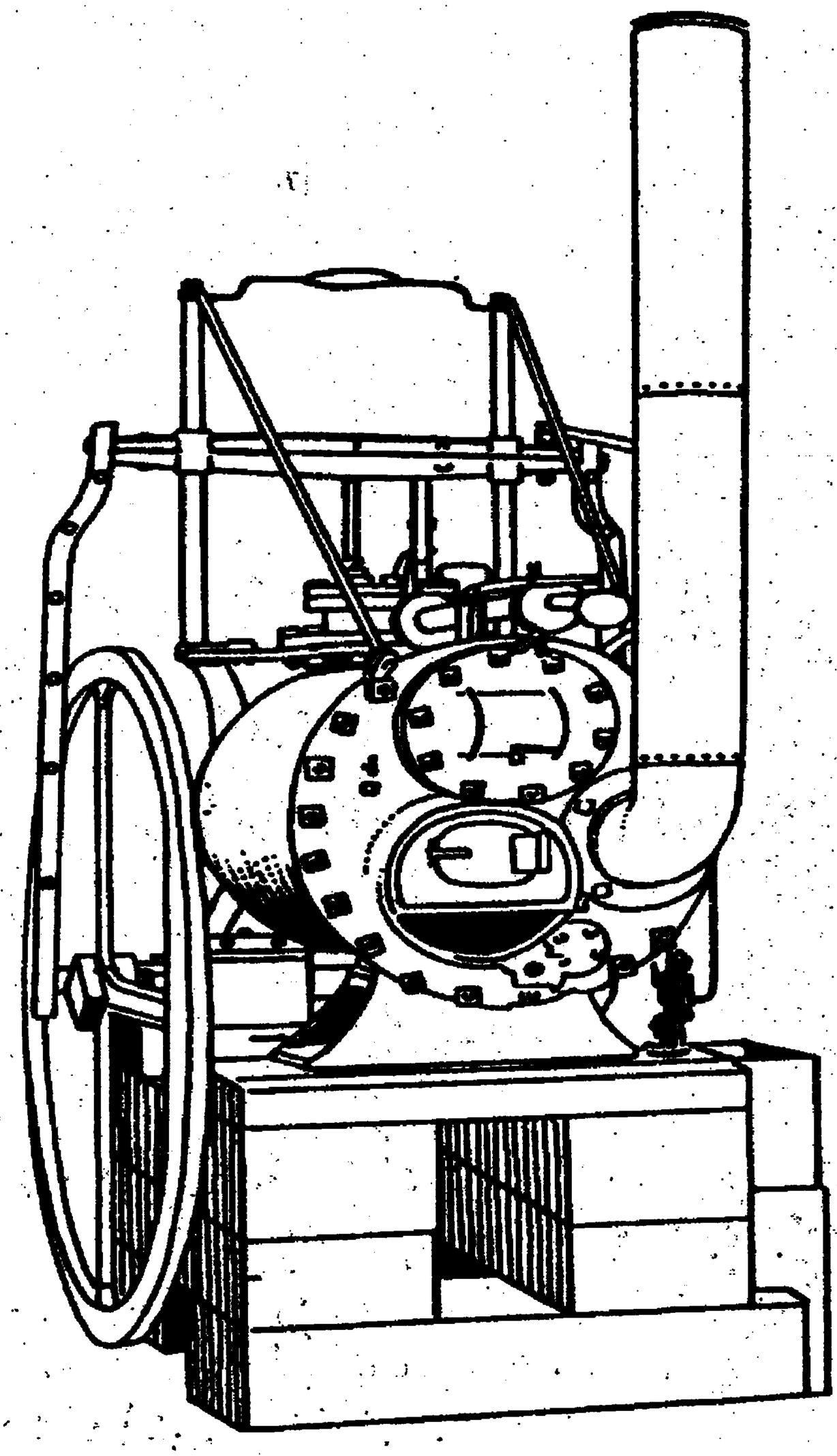


Fig. 146. La máquina de acción directa y alta presión, de Trevithick, patentada en 1802.

para promover de este modo su eficacia. En 1844 el rendimiento medio era de unos 45 millones de metros por kilogramo por cada 36,3 decímetros cúbicos de carbón, frente a los 4 millones de metros por kilogramo que rendía una máquina de Newcomen en 1767.

Otra vía de progreso fue la de las máquinas «de expansión múltiple», aunque esta denominación, para la adición de un cilindro de alta presión a la máquina Watt original, no se usó hasta bien entrado el siglo XIX. Una máquina de expansión múltiple de sólo 11,5 CV, construida por Jonathan Hornblower en 1780 para una mina de carbón de Radstock, sería calificada como una violación de la patente de Watt. Tras la expiración de esta patente, Arthur Woolf, que trabajaba para una fábrica de cerveza de Londres, hizo en 1803 un intento mucho más ambicioso, pero debido a un fallo en los cálculos su primer cilindro de alta presión resultó demasiado pequeño en proporción con el cilindro de baja presión. Más éxito tuvo cuando volvió a Cornualles, donde ya había realizado previas experiencias, aunque su máquina de expansión múltiple resultó demasiado costosa, y no volvió a hacer ninguna más a partir de 1824. Este tipo de máquinas sería desarrollado principalmente en el continente —en especial por Humphrey Edwards, antiguo socio de Woolf—, donde el coste relativamente alto del carbón alentaba su uso: en una máquina de balancín con dos cilindros que trabajaban uno al lado del otro, el ahorro en combustible era del orden del 50 por 100. Pero sólo en 1845 McNaught, de Bury, en Lancashire, encontraría un método realmente satisfactorio de transformar la máquina de Watt en una máquina de expansión múltiple: puso un cilindro de alta presión y carrera corta entre el centro del balancín y el vástago del cilindro, utilizando una presión de 8,4-8,8 kilogramos por centímetro cuadrado. Muchas de las máquinas de Watt que ya estaban en funcionamiento fueron transformadas

de este modo, y ésta llegaría a ser pronto la forma habitual de construcción de las nuevas máquinas.

Hasta el invento de McNaught, la máquina de balancín de Watt, movida por vapor a una presión sólo un poco mayor que la atmosférica, era la que con más frecuencia se utilizaba en los grandes molinos y fábricas, mientras que la máquina de alta presión de Cornualles no tenía rival en las minas y para bombear agua en general. En establecimientos más pequeños, donde el espacio era muy importante, se recurría a la máquina «saltamontes» o de balancín libre, patentada en 1803 por William Freemantle y llamada así por el aspecto del mecanismo usado para eliminar el enorme brazo del balancín. En los Estados Unidos, Evans usaba este mismo principio. Aproximadamente por esas mismas fechas se empezaron a producir máquinas de acción directa, siendo la más importante de ellas la máquina de mesa de Maudslay, patentada en 1807. Era ésta una máquina extremadamente compacta, montada sobre una pequeña plataforma de hierro colado. El vástago del pistón terminaba en una cruceta en cuyos extremos se articulaban un par de bielas que movían un eje de cigüeñal debajo de la plataforma. El cilindro, no obstante, estaba colocado en posición vertical, en la equivocada creencia de que así se evitaría el desigual desgaste causado por el peso del pistón; el uso de la máquina de cilindro horizontal, más eficaz, no se generalizaría hasta 1825, fecha en que fue introducida en Londres por Taylor y Martineau.

LA MAQUINA DE VAPOR APLICADA AL TRANSPORTE

Durante los primeros años del siglo XIX el aumento más regular que espectacular de la utilización de máquinas de vapor fijas se vio acompañado por las primeras aplicaciones con éxito de las máquinas de vapor al desarrollo de formas más modernas de transporte. El primer paso de importancia dado por

la humanidad en la conquista de la distancia, después de la aparición de la navegación a vela, exigía el descubrimiento de una máquina motriz segura, constante y poderosa: en una palabra, la máquina de vapor.

El tamaño y el peso de las primeras máquinas de vapor serían los causantes de que las primeras aplicaciones del vapor al transporte se hiciesen sobre barcos, aunque también en este caso las dificultades prácticas ponían a prueba el ingenio de los diseñadores. En las máquinas fijas usadas para bombear agua y para otras ocupaciones similares las desventajas de su gran tamaño, peso y elevado consumo de combustible estaban más que compensadas por la sencillez y baratura de su construcción, montaje y mantenimiento. En los barcos, sin embargo, las desventajas eran mucho más importantes; transportar un enorme peso muerto de maquinaria y combustible era claramente antieconómico. Es más, no sólo había que tener en cuenta el peso total sino su distribución, debido a que en los barcos se necesita un centro de gravedad muy bajo para lograr la estabilidad: el enorme balancín de las primeras máquinas de vapor estaba colocado a una gran altura, y por lo tanto se hacía necesaria una modificación en el diseño que situase el balancín a menor altura. La cuestión del abastecimiento de combustible tenía relativamente menor importancia, ya que los barcos de vapor estaban pensados sólo para navegar en ríos, lagos, canales y para viajar a lo largo de la costa, precisamente para que el frecuente abastecimiento de combustible no constituyese un problema. La situación cambió radicalmente, sin embargo, cuando se empezó a considerar la posibilidad de construir barcos que hiciesen travesías oceánicas: la desdichada historia del *Great Eastern* sirve para recordarnos que a mitad del siglo XIX los problemas de aprovisionamiento de combustible no habían sido resueltos satisfactoriamente, pues el fracaso de este notable navío fue debido principalmente a una seria infra-

valoración de su consumo de carbón. En el caso de barcos de guerra el problema era incluso mayor, debido a que, dada la naturaleza de los servicios que tenían que realizar, debían estar dispuestos para partir en cualquier momento hacia regiones donde el abastecimiento de carbón sería imposible o muy difícil.

Tales consideraciones ejercieron una poderosa influencia sobre el diseño de las primeras máquinas marinas de vapor. Se necesitaban máquinas de tamaño más reducido, más eficaces y que ofrecieran mayor seguridad: unas salas de máquinas y unos pañoles de carbón de menor tamaño significaban una mayor capacidad para las mercancías y los pasajeros. El diseño de las calderas fue examinado con más cuidado, pues el despilfarro de combustible era tanto o más importante que el de vapor.

Los iniciadores del barco de vapor fueron los franceses, quienes en 1775 aprobaron una máquina con un cilindro de unos 20 centímetros montada en un barco que navegaba por el Sena, pero no contaba con suficiente potencia. En 1783 el marqués de Jouffroy d'Abbans, tras una serie de intentos previos, remontó con éxito un sector del río Saona, cerca de Lyon, en un vapor de 182 toneladas dotado de una rueda de paletas, el *Pyroscaphe*. En 1787, en uno de los diversos experimentos hechos en América con sistemas de propulsión a vapor, se empleó una bomba que aspiraba agua por la proa del barco y la expulsaba por la popa, lo que constituyó un primer ejemplo de la propulsión a chorro. Al año siguiente, en Inglaterra, se utilizó una máquina de vapor atmosférica, construida por William Symington, para impulsar un barco de tamaño reducido en un lago cerca de Dumfries; por casualidad, entre las personas que se hallaban a bordo durante el paseo, que, como luego se demostraría, tuvo una cierta importancia para la historia nacional de Escocia, se hallaba el poeta Burns. En 1801 Symington, a instancias del ministro de la Guerra —una interesante indica-

ción de hacia dónde iban encaminados los proyectos sobre la propulsión a vapor—, construyó una máquina de doble efecto que tenía un cilindro horizontal de unos 56 centímetros de diámetro, con una biela que impulsaba el eje del cigüeñal de la rueda de paletas. A pesar de una serie de pruebas satisfactorias, no se llegó a implantarla definitivamente en el remolcador *Charlotte Dundas*, de servicio en el canal de Forth y Clyde, por miedo a los daños que las excesivas olas que levantaba pudiesen causar en las orillas; pero es notable que el sistema de acción directa, que acababa con el uso del molesto balancín, no fuese adoptado por los inmediatos sucesores de Symington.

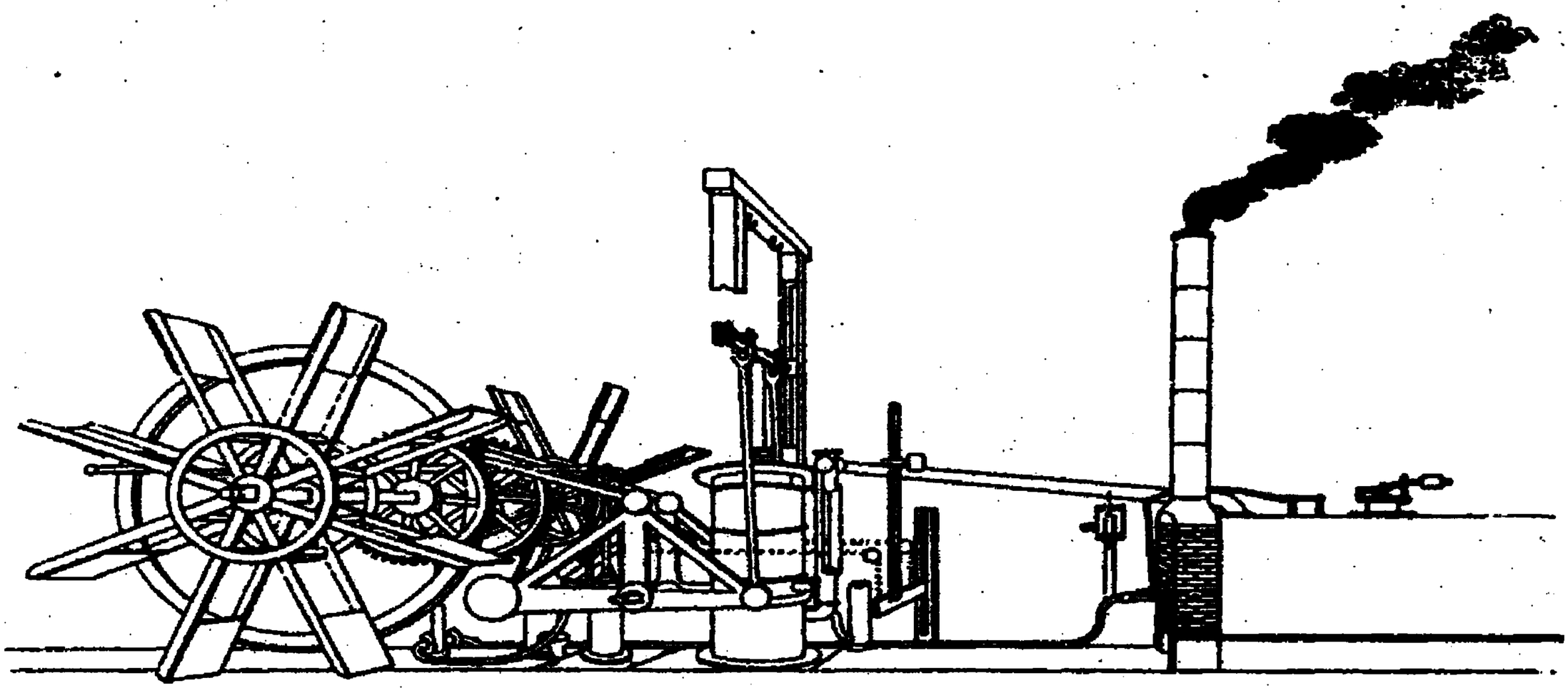


Fig. 147. Maquinaria del vapor de ruedas de paletas *Clermont*, 1807.

El americano Robert Fulton, que había asistido a las pruebas del *Charlotte Dundas*, llevó a cabo posteriores experimentos en el Sena, y en 1807 logró el primer éxito comercial con una máquina construida por Boulton y Watt, que conducía al vapor de ruedas de paletas *Clermont* (fig. 147) de Nueva York a Albany; a los dos años tenía un sucesor en el lago Champlain. La máquina de baja presión construida

en Glasgow para el *Comet* (fig. 148), primer vapor europeo con éxito comercial, que entró en servicio en el río Clyde en 1812, se asemejaba a la máquina de Fulton en que tenía un par de balancines situados a muy baja altura a ambos lados del cilindro vertical.

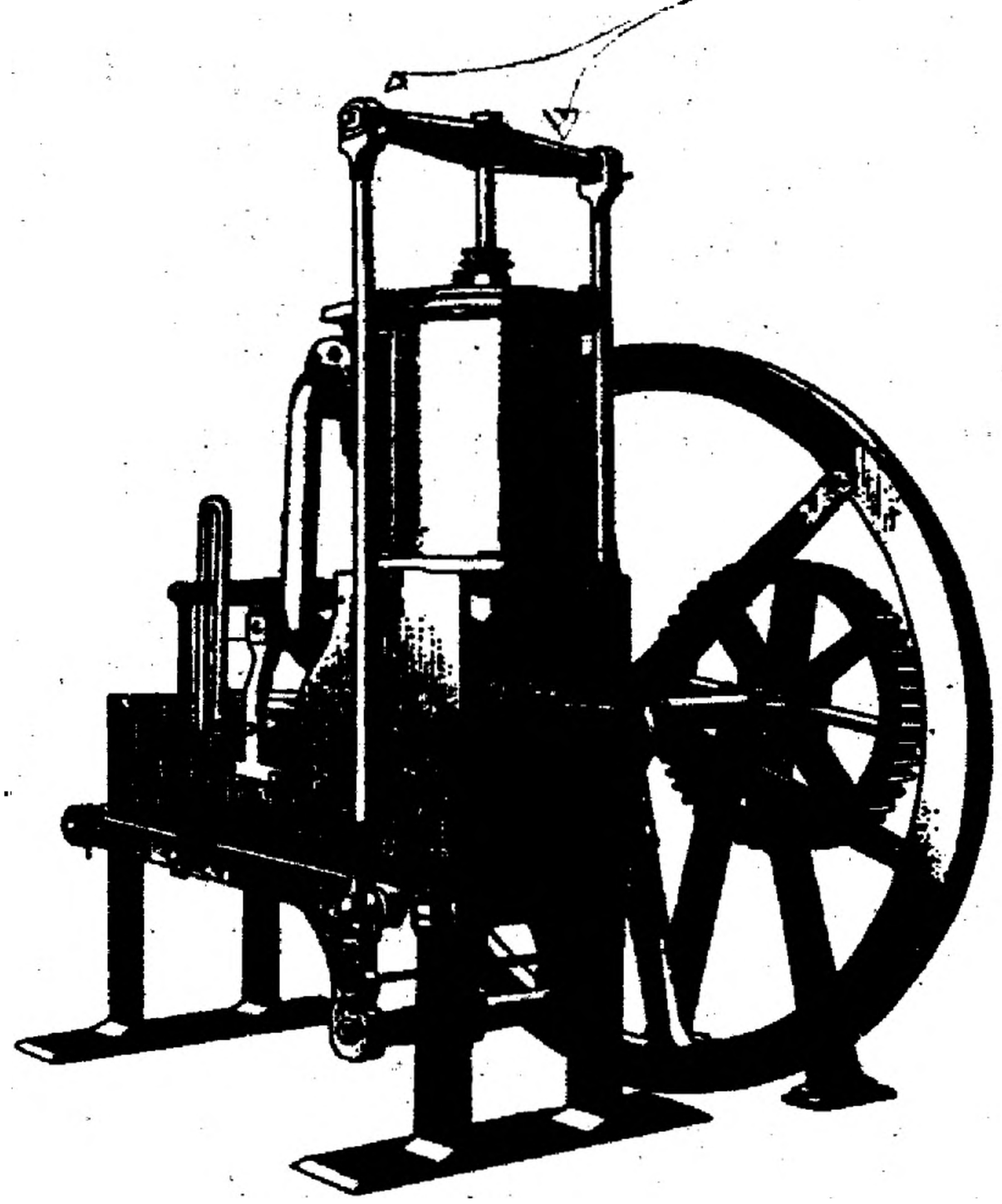


Fig. 148. Máquina del vapor de ruedas de paletas *Comet*, 1812.

La máquina convencional, con su pesado balancín superior, demostró su utilidad en vapores de poco calado, para navegación fluvial, que pronto se harían muy populares en América, debido a que, dadas las características del diseño de dicha máquina, la mayor parte del peso tenía que estar situada por encima del nivel del agua. Pero cuando se empezaron a desarrollar los vapores de paletas para rutas oceánicas, los ingleses se inclinaron en la práctica por las máquinas con balancines laterales, en que ambos balancines descendían hasta casi las mismas placas que servían de apoyo a la máquina, de forma que se rebajaba el centro de gravedad y se aumentaba la estabilidad. A principios de la década de 1830

se introdujo la máquina de vapor «de torre», en que los patines de la cruceta en que acababa la biela sobresalían de la cubierta del barco; de ahí el nombre. El objeto de este artificio era de nuevo superar los problemas resultantes de la limitada distancia vertical entre el eje de la rueda de paletas y la quilla del barco. Tras la introducción de las máquinas verticales de acción directa en 1837, la longitud adecuada de las bielas se consiguió por medio de los más diversos artificios, entre ellos la eliminación del vástago del pistón, uniendo directamente las dos bielas laterales a la parte superior del émbolo. En otros casos se llegaba a eliminar dicha biela de conexión, como ocurría en el caso de la máquina de cilindros oscilantes, que se convertiría en la más popular en los vapores de paletas, y en la que el vástago del pistón estaba conectado directamente al cigüeñal. Este artificio se usó en 1822 en el primer barco de hierro movido a vapor, el *Aaron Manby*, construido en Inglaterra para navegar por el Sena. En 1858 se construyeron máquinas de cilindros oscilantes de gran tamaño para un barco a vapor impulsado simultáneamente por ruedas de paletas y hélice, el *Great Eastern*, cuyos cuatro cilindros de unos 188 centímetros movían una hélice y unas ruedas de paletas de 17 metros de diámetro.

El barco de vapor sufrió un cambio decisivo con la sustitución de las ruedas de paletas por hélices. Lo que a primera vista resulta sorprendente es que, siendo el tornillo de Arquímedes un instrumento para la navegación conocido ya en la antigüedad clásica, hubiesen de pasar cuarenta años de experimentos —incluyendo los efectuados por John Fitch en Nueva York en 1796— antes de que en Inglaterra se iniciase con éxito la construcción del primer vapor de hélice, el *Archimedes*, de 237 toneladas, construcción iniciada en 1838. El invento fue hecho simultáneamente por (Sir) Francis Pettit Smith y el sueco John Ericsson, quien daría por terminada una estancia de trece años en Inglaterra para ir a vender

su idea en los Estados Unidos. Para este nuevo método de propulsión se necesitaba una velocidad de rotación relativamente elevada, de forma que en los vapores de hélice la transmisión al eje propulsor debía ser objeto de una multiplicación. Los temores de que una máquina de pistón ordinaria no pudiera alcanzar la velocidad suficiente como para ser conectada directamente al eje propulsor se mostraron al final injustificados, y se acabó diseñando varios tipos de máquinas con este propósito. En 1842 la Marina de los Estados Unidos introdujo en el *Princeton* un motor especial de hélice, diseñado para mantener toda la maquinaria del barco debajo de la línea de flotación con objeto de lograr una mayor seguridad, y al año siguiente el *Great Britain* sería el primer vapor de hélice que cruzase el Atlántico.

El uso de máquinas horizontales de acción directa estaba muy extendido, a pesar de que las bielas debían ser más cortas de lo conveniente a causa del limitado espacio transversal de los barcos de la época. Watt había patentado en 1784 una máquina de pistón tubular o «troncal» en la que la biela iba unida directamente al pistón; aunque tenía algunas desventajas inherentes a su diseño, fue muy utilizada a mediados del siglo XIX a causa del importante ahorro de espacio transversal que suponía. Cuando el *Great Eastern* inició su primer viaje en 1859, los diseñadores se mostraban ya propensos a la utilización de una máquina vertical invertida, que podía ser acomodada satisfactoriamente incluso cuando el desarrollo de los barcos de dos hélices gemelas exigió el empleo paralelo de dos máquinas gemelas. Cuando los barcos de guerra empezaron a estar equiparados con blindaje lateral, la máquina vertical invertida se convirtió en la normal en tal tipo de barcos.

En 1854 fueron por primera vez instaladas en un barco transatlántico, el vapor de hélice *Brandon*, máquinas de expansión múltiple. Las máquinas de triple expansión empezaron a utilizarse durante la década

de 1870, trabajando a una presión de 10,5 kg/cm², mientras que en 1900, para una utilización más económica del combustible, con presiones por encima de 12,5 kg/cm², se consideraban ya indispensables las máquinas de cuádruple expansión.

Los cambios introducidos en los diseños de las máquinas de vapor, y en especial el uso de presiones más elevadas, provocaron los correspondientes cambios en las calderas que las alimentaban. La evaluación del progreso viene ilustrada por el hecho de que mientras el *Comet*, en 1818, tenía una simple caldera construida de ladrillo, que producía vapor a una presión sólo un poco superior a la de la atmósfera, en 1900 la caldera de tubos de agua construida por Babcock y Wilcox, que era la normal en la Royal Navy, suministraba vapor a una presión de 17,5 kg/cm². Los problemas básicos consistieron en cómo aumentar la eficacia de las calderas y cómo obtener el suficiente vapor a presiones cada vez más altas para mantener el ritmo de desarrollo de las máquinas de vapor. La caldera de tubos de agua, una de las características de la locomotora *Rocket* de Stephenson, de 1829, que fue adoptada por primera vez para las máquinas navales en 1842, supuso un gran paso adelante debido a que aumentaba enormemente la superficie de agua expuesta al calor del hogar de la caldera. Las dificultades provocadas en los primeros momentos por la corrosión se vieron muy reducidas cuando los tubos de hierro fueron sustituidos por tubos de acero. En el mar, los problemas planteados por la corrosión eran especialmente acuciantes, ya que se usaba agua de mar para alimentar las calderas: se hacía necesario vaciarlas y rasparlas con frecuencia para quitar los depósitos de sal. La sustitución de los tubos de hierro por otros de cobre mitigó los problemas, pero no hubo solución satisfactoria hasta 1834, cuando Samuel Hall introdujo el condensador de superficie que proveía de agua destilada para alimentar la caldera.

A lo largo del período que ahora nos ocupa, el carbón sería el principal combustible en los barcos de vapor. Pero a partir de 1860 se estudiaría muy seriamente la posibilidad de utilizar combustible líquido, actuando como incentivo para ello la acumulación por la industria del petróleo, en rápida expansión, de grandes cantidades de fueloil para el que entonces existía poca demanda. Sin embargo, a pesar de lo mucho que se experimentó, el fueloil no encontraría demasiadas aplicaciones hasta el comienzo del nuevo siglo.

LOCOMOTORAS Y MAQUINAS DE VAPOR FIJAS

El problema de acomodar las máquinas de vapor en el interior del casco de los barcos de dimensiones relativamente pequeñas existentes a principios del siglo XIX puso a prueba el ingenio de los diseñadores. Acomodar la máquina de vapor dentro de los límites aún más reducidos de los locomóviles por carretera y por ferrocarril constituía un problema todavía más difícil. Sirva como medida de la capacidad de invención de los ingenieros de la época el hecho de que los problemas básicos hubiesen sido resueltos en la locomotora *Rocket* de Stephenson (fig. 149) ya en 1829.

1829

Fig. 149. La locomotora *Rocket*, de Stephenson.

[El primer año del siglo XIX, cuando Symington estaba diseñando su remolcador, Trevithick sacaba a la luz su primer carruaje movido a vapor: otros experimentos más tempranos habían sido ya llevados a cabo por Nicolas Cugnot (fig. 150) en Francia (1769) y por Murdock en Cornualles (1785). Para mantener caliente el cilindro vertical, Trevithick lo sumergió a medias en la caldera; la transmisión se efectuaba por medio de una biela conectada desde el vástago del pistón a las ruedas traseras. La máquina incluía un proceso especial inventado por Trevithick consistente en expulsar el vapor de exhaustación por la

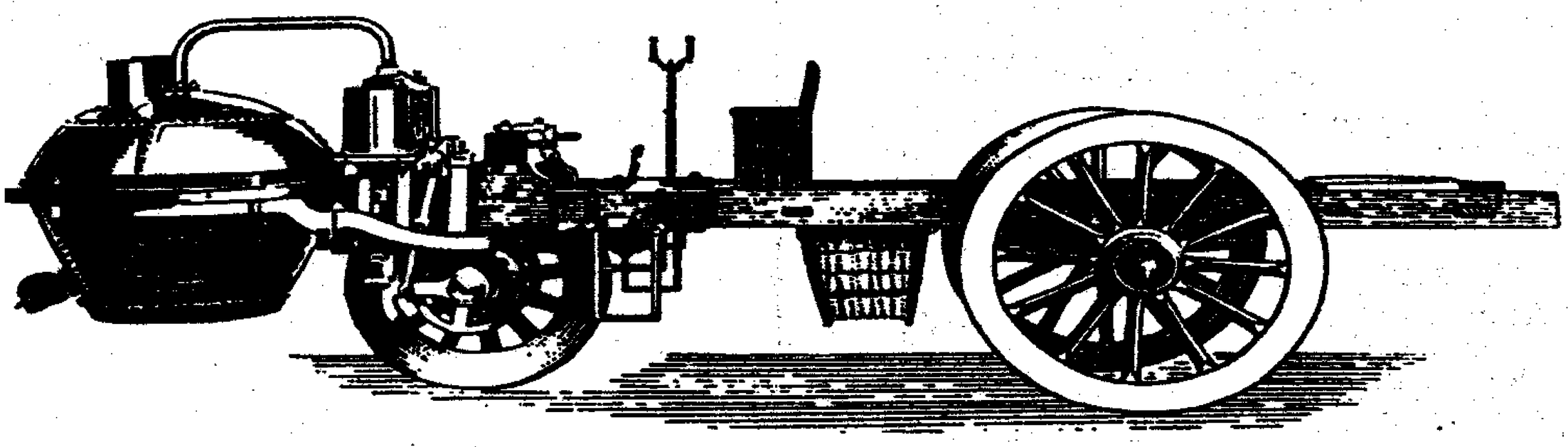


Fig. 150. El carruaje movido a vapor, de Cugnot, 1769.

chimenea para incrementar el tiro de ésta; si lo hubiese patentado, este invento le hubiese otorgado un dominio sobre el desarrollo de la locomotora comparable al que había conseguido Watt sobre las máquinas de vapor fijas por medio de su condensador. Su primer carruaje a vapor transportó a sus pasajeros a plena satisfacción, pero durante demostraciones posteriores se dejó que la caldera funcionase sin agua. En 1803 condujo un carruaje a vapor similar por las calles de Londres entre Holborn y Paddington, pero ello atrajo menos la atención del público que la explosión de la caldera de una de sus máquinas fijas de alta presión. A consecuencia de esta explosión, Trevithick introdujo un manómetro y una válvula de seguridad en la caldera.

Fue Trevithick quien de hecho ideó la combinación de la locomotora de vapor y los raíles, demostrando su conveniencia para el transporte no sólo de mercancías pesadas, sino también de pasajeros. Esto último constituyó un descubrimiento de la máxima importancia, pues mientras el transporte a vapor por carretera nunca llegó a alcanzar grandes proporciones, el desarrollo del servicio de pasajeros por ferrocarril fue uno de los grandes factores que configuraron la historia del siglo XIX.

En 1804 Trevithick diseñó una locomotora capaz de arrastrar una carga de 10 toneladas sobre unos rieles de hierro colado a lo largo de un recorrido de 15,5 kilómetros entre la herrería de Penydarran y el canal de Glamorganshire. Esta máquina demostró ser capaz de arrastrar cinco vehículos y setenta personas además de la carga especificada, moviéndose bajo el control de una sola persona a la velocidad de 8 km/h. Esta demostración sirvió además para silenciar a quienes afirmaban que la fricción entre una rueda de hierro y un carril también de hierro no era suficiente para permitir el uso de la tracción de vapor sobre rieles; y al año siguiente uno de los mecánicos de Trevithick construía una máquina similar en Gateshead para una mina de carbón de Tyneside. Fue éste un acontecimiento de mayor significado que los viajes en locomotora que por cinco chelines ofrecía al público de Londres en 1808 en un circuito cerca de Euston Square. Pues sería en la importante zona industrial del norte de Inglaterra donde George Stephenson, que se había dado cuenta de la importancia de los inventos de Boulton y Watt antes incluso de haber aprendido a leer, pondría en marcha por primera vez su «máquina ambulante» *Blucher*, con idéntico objetivo, once meses antes de Waterloo. La relación con Napoleón es más inmediata de lo que pudiera creerse, puesto que Stephenson y algunos más debieron la aportunidad de poder experimentar sus locomotoras de vapor, al menos en parte, al aumento del precio del

forraje para los caballos a causa de la guerra. El éxito de 1814 condujo, con el escalón intermedio de la *Locomotion núm. 1* construida en 1825, al decisivo triunfo de la *Rocket* de Stephenson en octubre de 1829, máquina que su hijo Robert le ayudaría a diseñar. La presión del vapor en la *Rocket* era sólo de 2,8 kg/cm², pero esta famosa locomotora serviría de modelo en el futuro con su caldera tubular y su transmisión directa entre el pistón y las ruedas motrices.

Había por entonces veintiséis locomotoras funcionando ya en Inglaterra, entre ellas dieciocho en las minas de carbón; dos habían sido exportadas a Francia, y cuatro a América. A pesar del rápido establecimiento del ferrocarril tanto en América como en Europa, los diseños de las locomotoras, sobre los que tendremos que volver ulteriormente, siguieron siendo durante un largo período un dominio, si no exclusivo, al menos sí primariamente británico: Marc Seguin, por ejemplo, patentó la caldera multitubular antes que Stephenson, y otro ingeniero francés, Henri Giffard, sería responsable de los primeros inyectores. Antes de este último invento, al que sorprendentemente se opusieron algunos ingenieros ingleses muy conservadores, no había medio de introducir agua para alimentar la caldera si la máquina se quedaba parada aunque sólo fuese durante un breve período de tiempo, lo cual constituía un grave inconveniente. En el diseño del bastidor o chasis de la máquina tuvieron lugar pocos cambios: la locomotora «colosal» de Gooch, construida en 1846 (fig. 151), fue una de las de mayor tamaño de su época. A mediados de siglo los ingenieros de locomotoras de vapor de todo el mundo basaban su trabajo o bien en un tipo con bastidor de chapa, característico de las locomotoras de vapor inglesas mientras se siguió construyéndolas, o bien en un tipo con bastidor de barras, elaborado en los Estados Unidos. Eran ya corrientes las velocidades de más de 95 km/h.

En la década de 1860 los diseños ingleses de má-

quinas locomotoras se vieron afectados por la sustitución del carbón por coque, usado, aunque fuese más caro, para cumplir con el requisito legal de que las locomotoras en Inglaterra «consumieran de forma efectiva su propio humo». Se inventaron cajas de fuegos muy complejas para lograr la combustión total del carbón; éstas eran de consumo muy económico, y una de ellas se mostró capaz de llevar un tren expreso cargado, en condiciones poco favorables, gastando sólo unos 6 kilogramos de carbón

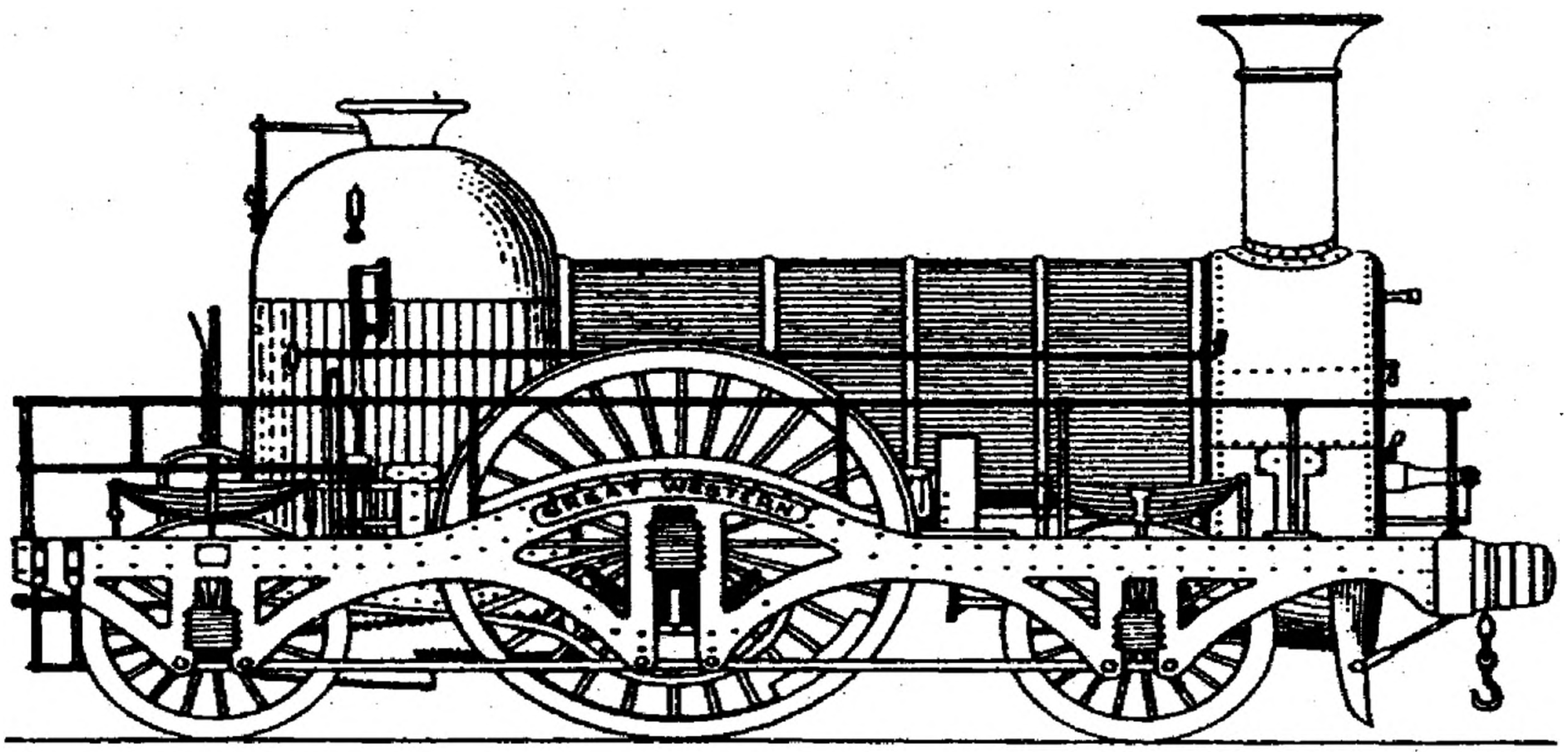


Fig. 151. La locomotora «colosal», de Gooch, fabricada para la Great Western Railway en 1846

por kilómetro. Los diseños de las cajas de fuegos, no obstante, variaban mucho de acuerdo con el combustible empleado: en muchos países se quemaba normalmente madera y en Rusia se llevaron a cabo experimentos con combustibles líquidos.

Los diseños de máquinas británicas se siguieron usando mucho en el continente, y en algunos casos demostraron ser más adecuados para las rutas continentales que para las británicas. Se podían encontrar ingenieros británicos en los ferrocarriles de Alemania y Austria, pero la industria ferroviaria rusa fue iniciada principalmente por americanos. Una excepción al predominio general angloamericano en este período fue Bélgica, que tuvo la primera línea

de ferrocarril del continente y produjo el mecanismo Walschaerts de distribución por válvulas, usado por los ferrocarriles británicos y por muchos otros hasta hoy día.

Uno de los objetivos obvios de los diseñadores de locomotoras era el de economizar combustible a base de usar máquinas de expansión múltiple, pues la distancia que una máquina podía recorrer sin detenerse estaba limitada por la cantidad de combustible y agua que podía llevar encima y la exigencia de reducir la proporción peso-energía era constante. A finales del siglo XIX la expansión múltiple constituía una práctica corriente: en Inglaterra el tipo más común de máquina perfeccionada fue la diseñada por Francis Webb, que tenía dos cilindros de alta presión en el exterior que movían el eje trasero, y un cilindro de baja presión de gran tamaño situado en medio que movía el eje central (fig. 152). Una locomotora de diseño alemán de expansión múltiple con dos cilindros fue bastante empleada en Inglaterra y dio buen resultado en aquellos países, como la propia Alemania, Suecia e Irlanda, donde las velocidades programadas eran menores. Pero durante largo tiempo la sede principal de las locomotoras de expansión múltiple fue Francia, donde A. G. de Glehn diseñó a partir de 1880 máquinas de cuatro cilindros de enorme éxito.

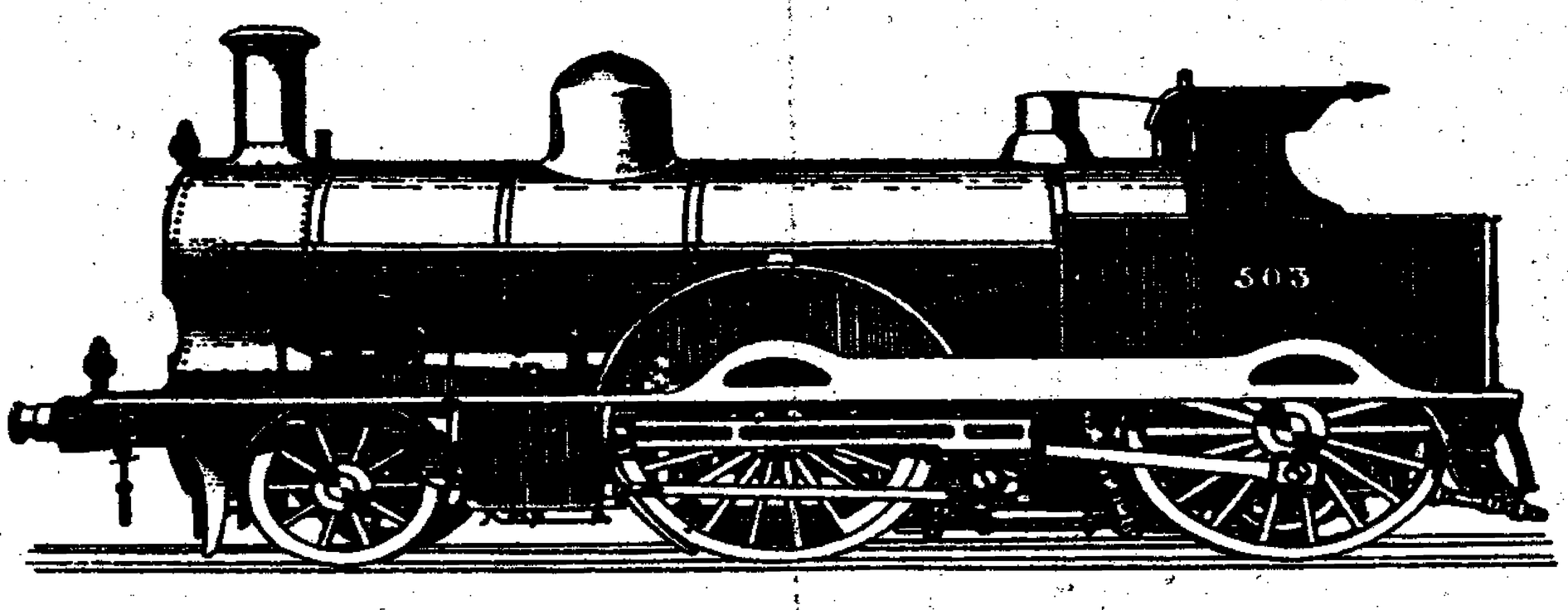


Fig. 152. La máquina rápida de expansión múltiple de tres cilindros, de Francis Webb, fabricada para la London and North Western Railway en 1884.

En la segunda mitad del siglo, un cambio importante experimentado por las locomotoras consistió en el gran aumento de su tamaño: las primeras locomotoras rápidas con seis *bogies* acoplados aparecieron en Italia en 1884. En Inglaterra fueron introducidas en 1859 las ruedas motrices acopladas que proporcionaron un mejor agarre sobre los raíles, y el uso de modernos bogies de cuatro ruedas, amplia base y pivote lateral, contribuyó asimismo a alentar la construcción de locomotoras más grandes y potentes, a lo que también contribuyeron los frenos Westinghouse (p. 559), usados por primera vez en 1868 en trenes americanos de pasajeros. No obstante, no se habían producido cambios radicales en los diseños; la influencia de los primeros modelos británicos siguió siendo evidente en el continente europeo, y en la industriosa América de 1890 las locomotoras de la New York Central todavía eran descendientes directas de aquellas que posibilitaron el avance de Sherman desde Chattanooga a Atlanta en la guerra terminada hacía ya treinta años.

DESARROLLO POSTERIOR DE LA MAQUINA DE VAPOR

En la segunda mitad del siglo XIX la máquina de vapor se adueñó del mundo civilizado. Entre 1840 y 1880 la potencia de las máquinas de vapor instaladas en el mundo pasó de 2 millones a 28 millones de cv. Cada año se extendía a nuevos países, nuevas industrias, nuevos servicios —en la década de 1860, por ejemplo, transformó por completo las bombas contra incendios—, mientras que la red de comunicaciones, servida por los barcos de vapor y el ferrocarril, ampliaba y unificaba a la vez las áreas civilizadas. Pero no existieron cambios fundamentales —excepto la introducción de la turbina de vapor a finales de siglo, a la que haremos referencia posteriormente— en la máquina de vapor como tal: no obstante cada uno de sus detalles había sido muy

perfeccionado. Existían mejores diseños, mejores materiales y mejores métodos de manufactura, lo que dio como resultado una proporción energía/peso más favorable y un uso más económico del combustible, mientras que el desarrollo de la industria de máquinas-herramienta (cap. 12) tuvo también profundas consecuencias.] Por lo menos el progreso se apoyaba igualmente en la creciente eficacia de la maquinaria a la que iba conectada la ahora suprema fuerza motriz, como en el caso de la sustitución de las ruedas de paletas por hélices en los barcos de vapor.

[Una tendencia importante a partir de 1826 fue la del creciente uso de máquinas horizontales, con un cilindro de doble efecto sostenido por un bastidor lateral de hierro colado, y un mando que regulaba automáticamente la expansión de acuerdo con la carga. Un sistema perfeccionado de distribución por válvulas fue inventado por G. H. Corliss en América. La expansión múltiple se extendió enormemente, estando colocados los cilindros de alta y baja presión o bien uno detrás del otro o bien uno al lado del otro, al ser normalmente de diámetro distinto pero de la misa carrera: un ejemplo famoso, aunque se tratase de cilindros del mismo diámetro, fue el construido por Corliss para la Exposición Americana del Centenario en Filadelfia en 1876, en el que se transmitía el impulso a la maquinaria por medio de un volante de unos 9 m. de diámetro a una velocidad de 360 r.p.m. Otra innovación de mediados de siglo, que se convirtió en una práctica habitual para las bombas de agua y los soplantes de altos hornos, fue una máquina vertical con el cilindro en la parte superior y el eje del cigüeñal debajo; esta máquina fue inventada por James Nasmyth, y se asemejaba a su famoso martillo-pilón de vapor.]

[En el último cuarto de siglo se hacían cada vez más necesarias máquinas que desarrollasen altas velocidades capaces de impulsar dinamos. Un modelo vertical que tuvo mucho éxito fue diseñado en los

Estados Unidos por George Westinghouse, pero el adelanto más importante fue el llevado a cabo en Inglaterra por P. W. Willans, cuyas patentes obtendría en 1884 y 1885. Ideó una máquina de expansión múltiple con los cilindros de alta presión en su parte superior, de simple efecto y movimiento muy uniforme, en la que el vapor era distribuido por un sistema nuevo de válvulas de pistones verticales que se movían arriba y abajo en el interior del vástago del pistón, que era hueco y con una serie de lumbreras abiertas en su superficie. Eran construidas como máquinas de simple, doble y triple expansión. Willans fue un precursor de la normalización, elaborando piezas a máquina con un error de menos de 0,025 mm, y haciendo que el cilindro de alta presión para una máquina de un tamaño determinado correspondiese exactamente al cilindro de baja presión de otra; pistones, juntas, válvulas y otras muchas piezas eran también intercambiables. Entre 1890 y 1900 fueron construidas muchas máquinas de este tipo para mover generadores eléctricos, y a finales de siglo el máximo de potencia había subido hasta 2.400 cv.

Las máquinas verticales de doble efecto eran, pese a todo, las más comunes, y tras el invento de un sistema de lubricación a presión en 1890 dejaron de ser temidas, como antes, las consecuencias de su funcionamiento no demasiado regular. Las máquinas con condensación del vapor de escape y triple expansión de mayor tamaño, que utilizaban vapor recalentado, podían desarrollar hasta 2.900 cv en las proximidades del año 1900, pero para entonces ya se encontraba en funcionamiento la turbina de vapor y había empezado el declinar de las grandes máquinas de vapor alternativas.

LAS TURBINAS DE VAPOR

La aparición de las máquinas de cuádruple expansión (p. 479) completa la historia de un siglo de desarrollo que comienza con las máquinas de vapor de Watt y Trevithick. La máquina motriz era todavía esencialmente la misma al final del período que al principio del mismo, aunque incomparablemente más eficaz. Pero con la aparición de la turbina de vapor, los inventores del siglo XIX dotaron al mundo de una nueva máquina motriz nacida de estudios antiguos sobre la utilización del vapor y basada en distintos principios.

La «esfera de Eolo» de Herón, en el siglo I de nuestra era, podía ser descrita como una especie de turbina de reacción, puesto que hacía uso directo de la presión ejercida por un chorro de vapor. De nuevo, en el siglo XVII no sólo encontramos el esquema fantástico de una turbina de aire, a la que ya hemos hecho referencia (p. 356), sino también proyectos de un tren de laminación movido por aire caliente procedente de una chimenea, y de un bocarte movido por un chorro de vapor. En 1784 el barón húngaro Kempelen despertó en Watt por un momento el miedo a la competencia con su proyecto de una turbina de vapor, que sería tomado más seriamente en cuenta por Trevithick treinta años más tarde. La «máquina giratoria» de Trevithick consistía, en líneas generales, en un par de brazos huecos montados sobre un eje: al extremo de cada uno de estos brazos había una perforación por la que escapaba vapor de agua en dirección tangencial y con una presión de 7 kg/cm², haciendo que los dos brazos girasen en torno al eje sobre el que estaban montados. Su debilidad consistía en que la velocidad de rotación de 250 r.p.m., que era la máxima que podía alcanzar, representaba sólo aproximadamente un quinto de la fuerza potencialmente aprovechable del vapor de agua.

La moderna turbina de vapor (a la que más tarde tendremos que referirnos brevemente en relación con la producción de energía eléctrica) fue diseñada, a partir de la turbina hidráulica, por Ch. A. Parsons, hijo menor del conde de Rosse e ingeniero de excepcional habilidad e ingenio. El motivo inmediato de su investigación era la urgente necesidad de una máquina que pudiese mover directamente una dinamo, para lo que era aconsejable una velocidad mayor de la que obviamente podía alcanzar la máquina de vapor alternante. Haciendo que el vapor pasase a través de una serie de turbinas elementales de pequeño tamaño, consiguió un alto grado de eficacia, así como una satisfactoria velocidad de revolución. De esta forma la caída de presión sufrida por el vapor al dilatarse se dividía en una cantidad de pequeñas etapas, que por razones teóricas eran consideradas necesarias para lograr que funcionase eficazmente. La parte exterior de una turbina consistía en una carcasa circular fija conocida por el nombre de estator, provista de hileras de álabes fijos en su parte interior; un eje central, el rotor, iba provisto de una corona de álabes similares. El vapor, que circulaba a través del estator en una dirección paralela al eje o rotor, pasaba alternativamente a través de los dos juegos de álabes, haciendo rotar al eje. Parsons obtuvo las primeras patentes en 1884, y ese mismo año puso en funcionamiento el primer turbogenerador, que giraba a una velocidad de 18.000 r.p.m. Tres años más tarde construyó una turbina de reacción con fases de alta y baja presión, y en 1891 construyó la primera turbina de condensación, que demostró consumir menos vapor que una máquina de vapor convencional de igual capacidad; lograba también aventajarla en ahorro de espacio, seguridad y ausencia de vibraciones. Pero mientras tanto Parsons había sufrido un grave contratiempo al perder el control de sus patentes, de forma que había tenido que abandonar las turbinas de flujo axial (es decir, aquéllas en las que el fluido circula en dirección paralela al eje) para

dedicar su atención a las turbinas de flujo radial o centrífugas, de menor eficacia. No obstante, en diciembre de 1893 recuperó el control de las patentes, y el último año del siglo construyó la primera turbina con dos cilindros acoplados —dotada de turboalternadores que generaban cada uno de ellos 1.000 kilowatios— para la ciudad alemana de Elberfeld.

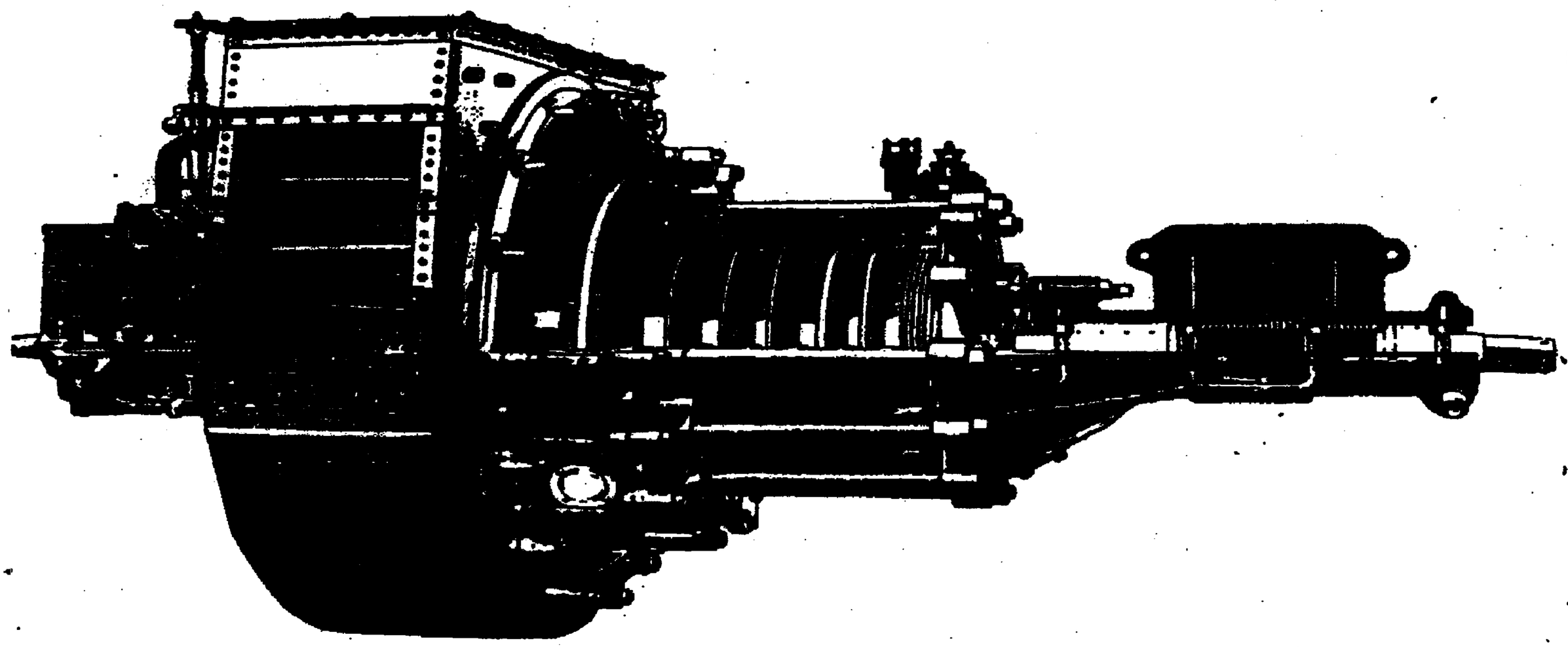


Fig. 153. Turbina de flujo radial del *Turbinia*, 1894.

Parsons coronó su logro de proporcionar a la industria eléctrica, en rápido crecimiento, una máquina motriz adecuada a sus necesidades, con su éxito al utilizar por primera vez la turbina de vapor como sistema de propulsión naval. Su primer intento, efectuado en 1894 con una turbina de flujo radial (figura 153), fracasó debido a que el diseño de la hélice estaba hecho de tal forma que a la elevada velocidad a que giraba no podía proporcionar el necesario impulso. En 1896 diseñó un sistema con tres ejes, cada uno de los cuales llevaba tres hélices, movidas por una serie de turbinas conectadas, estando situadas las de alta y media presión a los lados, mientras que en el centro iba una turbina de baja presión; tenía una turbina independiente, conectada al eje central, para la marcha atrás. Las dificultades en el diseño

de las hélices fueron superadas aumentando el área de su superficie. Las tres turbinas juntas desarrollaban cerca de 2.000 cv, y el *Turbinia* (fig. 154), cuando hizo su primera aparición en las maniobras navales de 1897, impresionó «a comandantes y monarcas» con su hasta entonces inaudita velocidad de 34,5 nudos.

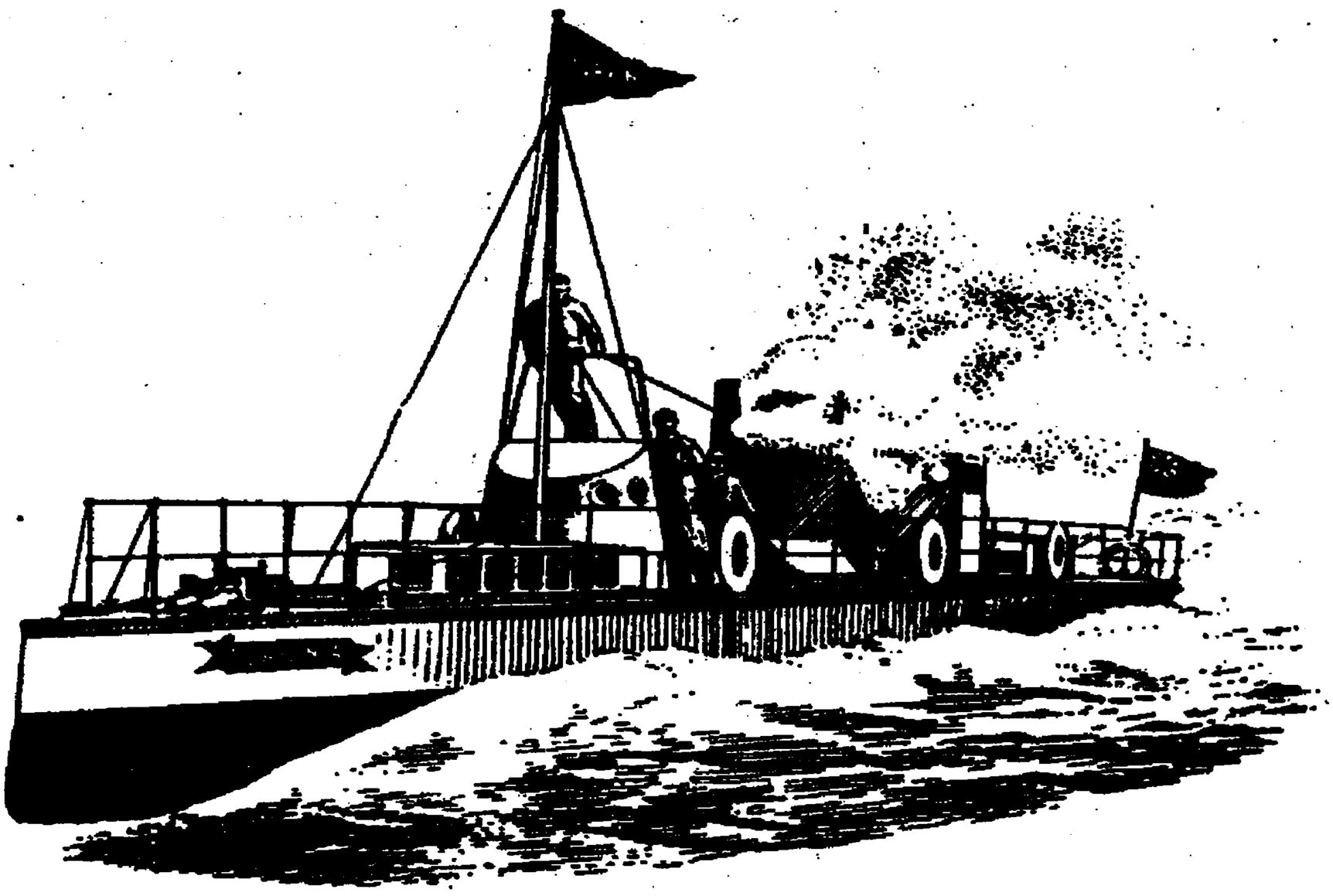


Fig. 154. El *Turbinia* a toda velocidad, 1897.

Se vio, no obstante, que las turbinas desarrollaban velocidades mayores de las convenientes para las hélices. De ahí que cuando el uso de la turbina se extendió enormemente como sistema de propulsión para los barcos se introdujesen engranajes para reducir la velocidad de giro, así como engranajes de doble reducción para los barcos mercantes de marcha moderada en los que se exigía que las hélices girasen a una velocidad inferior a las 100 r.p.m. Como índice de la velocidad a que se desarrollaron las turbinas marinas, puede señalarse que al cabo de una década los barcos de línea de la Cunard iban provistos de turbinas de 70.000 cv, y que éstas habían sido adoptadas también por la Marina inglesa.

Gustavo de Laval, contemporáneo de Parsons, había desarrollado en Suecia una turbina de distinto diseño. La turbina de De Laval, perfeccionada en 1887, no era en líneas generales otra cosa que un «molino de viento» movido a vapor, en que el chorro de vapor incidía sobre los álabes situados alrededor del borde de una rueda. Este mecanismo, comparativamente muy sencillo, logró no obstante una considerable aceptación para máquinas de pequeña potencia, especialmente después de que Curtis, en los Estados Unidos, introdujese un sistema de escalonamiento de velocidades, en el que se utilizaba una segunda y en ocasiones una tercera corona de álabes para utilizar la energía remanente en el vapor después de haber atravesado éste la primera corona de álabes. Una limitación importante de la turbina simple es que el vapor pierde su presión en una sola etapa al salir de la tobera; la ventaja del método de Parsons, como hemos visto, consistía en que la reducción de presión se producía a lo largo de una serie de etapas.

LOS FUNDAMENTOS TEORICOS

El desarrollo de la máquina de vapor a partir del «amigo del minero» de Savery de 1698 hasta la turbina rápida de Parsons de 1884 se corresponde, si bien no exactamente, con un inmenso avance en el conocimiento de los principios científicos subyacentes, y este capítulo quedaría incompleto si en él no hiciésemos una referencia, aunque sólo sea somera, a estos principios. En términos generales la máquina de vapor es un mecanismo que convierte la energía térmica en energía mecánica, y su rendimiento se rige por las leyes de la termodinámica. Estas leyes, no obstante, no fueron establecidas hasta mediados del siglo XIX, y por tanto, hasta entonces, en ningún modo había sido entendida la naturaleza del calor: esta circunstancia nos recuerda una vez más que tecnolo-

gía no es, en modo alguno, sinónimo de ciencia aplicada.

La máquina de vapor es una máquina térmica, y lo que es curioso es que su desarrollo llegase hasta donde llegó sin que se tuviera una idea clara sobre la naturaleza del calor. El calor fue durante mucho tiempo considerado un fluido, sin peso ni sustancia, que pasaba de un cuerpo caliente a otro frío. Aunque errónea, esta concepción fue de gran utilidad, puesto que impulsó a Joseph Black, cuyas ideas influyeron grandemente en Watt a llevar a cabo una serie de experimentos cuantitativos que le condujeron a la formulación de los conceptos de calor latente y calor específico. Como unidad de medida, Black utilizó la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una determinada cantidad de agua hasta un límite determinado: la cantidad de calor requerida por cada sustancia para elevar su temperatura hasta un límite determinado —calor específico— es variable. Mostró asimismo que para convertir agua en vapor se requiere, a la misma temperatura, una cantidad definida de calor: este calor «latente» se libera cuando el vapor se vuelve a condensar. Sobre estas bases pudo Watt medir la eficacia relativa de las distintas máquinas de vapor, midiendo el calor empleado y la energía mecánica desarrollada. Como ya hemos visto, en 1767 Smeaton había llevado a cabo mediciones semejantes cuando el rendimiento de las bombas de agua era medido en función del trabajo realizado por cada 36,3 decímetros cúbicos de carbón consumido, pero este tipo de cálculos era menos satisfactorio, ya que contenía un factor desconocido, esto es, la cantidad de calor desprendido del combustible que de hecho era empleado en la máquina.

La naturaleza de la relación entre calor y trabajo fue examinada con más profundidad por Benjamin Thompson, conde de Rumford, quien fundó en 1799 en Londres la Royal Institution. Siendo Ministro de la Guerra en Baviera, hizo un estudio sobre la can-

tidad de calor desprendido durante el barrenado de un cañón de latón. Este fenómeno, muy conocido, había sido explicado con el supuesto de que un bloque de latón contenía más «calórico» que la misma cantidad de latón en piezas: la diferencia en este caso debería manifestarse en forma de calor cuando el bloque de bronce fuese dividido en piezas. Rumford, no obstante, descubrió que el calor específico de las piezas era el mismo que el del bloque original entero. La conclusión que sacó de ello fue que el calor era una forma de movimiento, y que en tal supuesto derivaba del trabajo realizado durante el proceso de barrenado del cañón. Aunque de la obra publicada por Rumford se podría haber sacado una medición del equivalente mecánico del calor, éste en realidad no hizo los cómputos necesarios: este trabajo sería emprendido por J. P. Joule, cuyas valoraciones, sustancialmente iguales a las aceptadas hoy, serían publicadas en 1847 en *The Philosophical Magazine*. El establecimiento de una precisa relación entre calor y trabajo fue un acontecimiento de importancia capital —aunque sólo muy gradualmente sería reconocido como tal— para el diseño de cualquier tipo de máquina que utilizase el calor como fuente de energía. Estableció bastante inequívocamente que, al margen del tipo de máquina térmica empleado, tenía necesariamente que existir un límite —ulteriormente definido por la segunda ley de la termodinámica (véase más adelante)— para la cantidad de trabajo obtenido, dada una cantidad determinada de calor utilizado.

[La obra de Joule fue de importancia fundamental para el enunciado de una de las teorías físicas más importantes del siglo XIX: la teoría de la conservación de la energía. En pocas palabras, esta teoría afirma que si desaparece una cantidad de una determinada clase de energía, en su lugar aparece una cantidad exactamente equivalente de energía de otro tipo. Es ésta la primera ley de la termodinámica: en efecto, esta ley establece que la energía, como la ma-

teria, no puede ser creada ni destruida. Estos dos principios básicos de la conservación de la materia (p. 393) y de la energía dominaron la ciencia del siglo XIX: en el siglo XX ambos principios debieron ser unidos a la luz de los descubrimientos hechos en el terreno de la física atómica, pero para propósitos prácticos se aplican rígidamente en casi todos los dominios de la ciencia y de la tecnología.

De la primera ley de la termodinámica derivó la segunda, enunciada en 1851 por William Thompson (Lord Kelvin) y por R. J. E. Clausius: concisamente, en pocas palabras establece que para cada máquina que utilice el calor como fuente de energía existe un máximo teórico de eficacia. La segunda ley de la termodinámica gobierna virtualmente todos los procesos en que existe transformación de calor, y de ahí que sea aplicable a una gran cantidad de procesos tecnológicos y no simplemente a la máquina de vapor y a otras máquinas térmicas. 1

12. LA MAQUINA-HERRAMIENTA Y SUS PRODUCTOS

INTRODUCCION

El desarrollo por Watt y Trevithick de la máquina de vapor hizo posible el nacimiento de una civilización basada en máquinas movidas por energía mecánica, pero no creó por sí mismo tal civilización. De hecho, como ya hemos visto, la máquina de vapor tardó algo así como medio siglo en convertirse en la principal fuente de energía para la industria. Existieron dos causas principales para ello. Una de las causas la constituyeron las condiciones en que tenía que desenvolverse el comercio durante las grandes guerras napoleónicas y después de ellas; la otra causa, no menos importante, tuvo su origen en las dificultades puramente técnicas que planteaba la construcción de las máquinas de vapor y de la maquinaria a la que transmitían su energía. A este respecto ya hemos señalado que las enormes máquinas de balancín siguieron construyéndose aún mucho después de que se dispusiese de otras máquinas de vapor mucho más perfectas por el simple hecho de que aquéllas entraban perfectamente dentro de los límites impuestos por los materiales y la artesanía de la época. La fabricación manual y dentro de unos altos niveles de precisión de algunas de las piezas de la máquina era no sólo prohibitiva en términos económicos, sino simplemente imposible. El ritmo con que fueron variando estos niveles de precisión queda ilustrado claramente por el hecho de que en 1776 Boulton se mostrase entusiasmado porque Wilkinson hubiese podido construir para él un cilindro de 127 centímetros que «no tenía en parte alguna errores superiores al grosor de un chelín de los antiguos», mientras que en 1856 (Sir) Joseph Whitworth usaba

normalmente en sus talleres una máquina capaz de medir hasta una millonésima de pulgada. Whitworth condenó definitivamente los antiguos métodos de trabajo que operaban con límites de error tan poco significativos como «un dieciseisavo» o «un treinta y dosavo de pulgada», con los que muchos ingenieros —aunque no todos— se contentaban entonces: afirmó que con sus métodos era más fácil trabajar con precisiones de una milésima de pulgada, que con límites de una centésima de pulgada usando los métodos antiguos. La aceptación general de estos nuevos niveles de precisión no sólo hizo posible la realización práctica de nuevos inventos y diseños, sino que abrió el camino a los métodos de producción masiva, característica esencial de la industria moderna. Ya no era necesario construir cada máquina independientemente: por el contrario, se podían manufacturar las distintas piezas por separado y en gran número y montar posteriormente la máquina a base de un surtido de piezas intercambiables. Este modo de producción, que tuvo su origen en Francia pero que sería desarrollado principalmente en los Estados Unidos, modificó profundamente el papel desempeñado por el individuo: los artesanos empezaron a estar cada vez menos dedicados a la construcción de un proyecto completo y cada vez más a la construcción de partes limitadas del mismo, no llegando quizá nunca a conocer el resultado final de su trabajo.

Aunque la necesidad de una mayor precisión fue el factor más importante que motivó que los ingenieros dedicasen su atención a las máquinas-herramientas, también influyó la frecuencia con que tenían que trabajar grandes piezas de metal de enorme peso. La industria de la máquina-herramienta se convirtió así en una importante característica de las últimas fases de la revolución industrial: se ha llegado a decir inclusive que la fabricación de máquinas para hacer máquinas fue su rasgo peculiar más importante. Aunque haya mucho de verdad en esta afirmación, sin embargo puede inducir a engaño, puesto

que puede dar la impresión de que la construcción de máquinas-herramienta ha sido un logro exclusivo del siglo XIX, cuando en realidad sus comienzos se remontan muchísimos años atrás. En el siglo XVIII, por ejemplo, los fabricantes de relojes e instrumentos científicos usaban tornos y máquinas de roscar y divisores de una extremada precisión, lo que nos sirve para recordar una vez más que cuando se requiere una gran precisión los métodos de trabajo

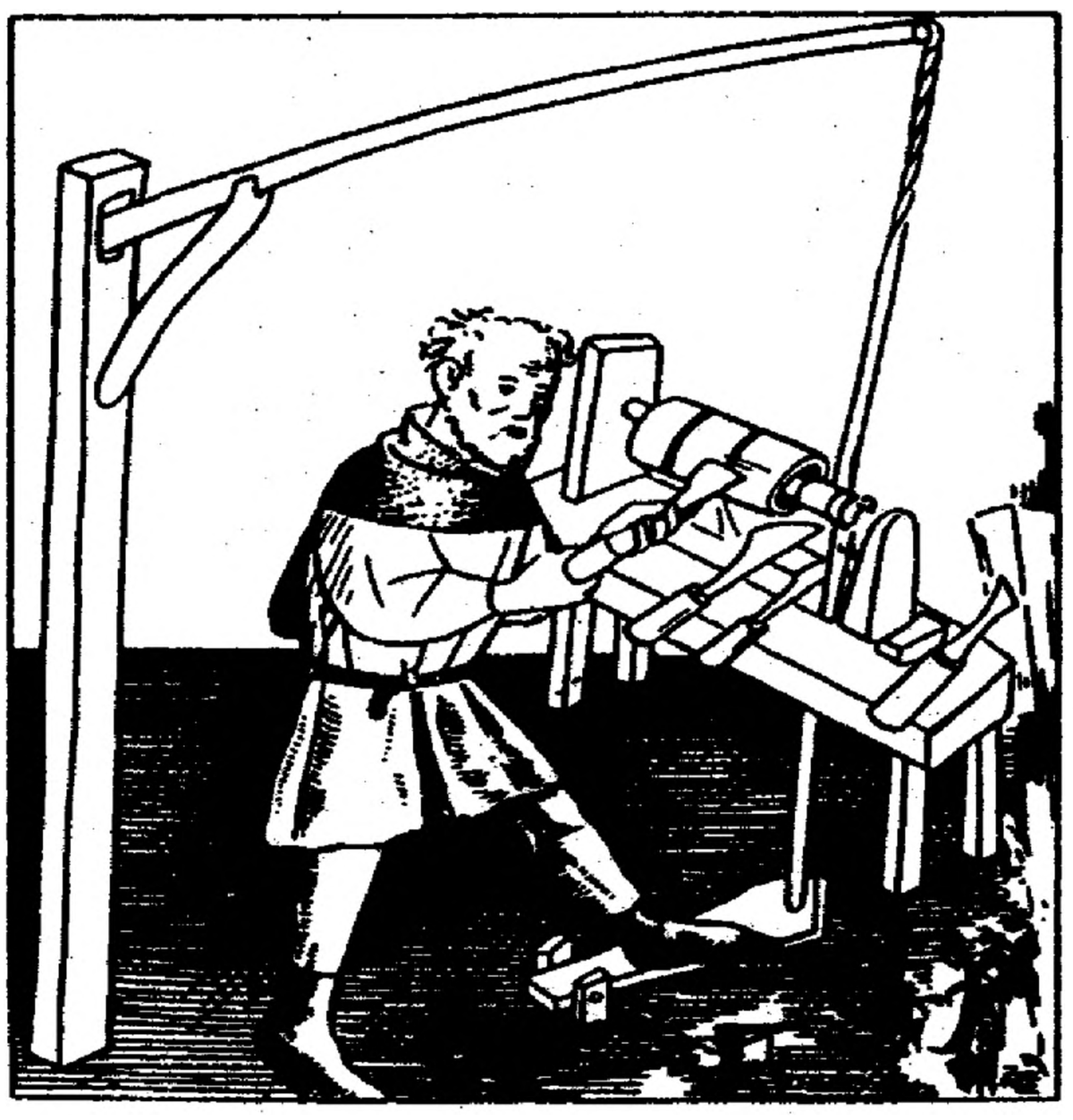


Fig. 155. Torno accionado con el pie, 1395.

mecánicos son no sólo más baratos y más adecuados que el trabajo manual, sino con frecuencia indispensables. Los tornos de madera se usaban ya mucho antes de esas fechas, y se pueden ver representados en algunas obras medievales (fig. 155): es más, se les puede considerar como una derivación de los tornos de alfarero, un instrumento procedente de la más remota antigüedad. No obstante, el uso generalizado de máquinas-herramienta es ciertamente un logro del siglo XIX. William Fairbairn subrayó en su discurso inaugural como presidente de la British Association, en 1861, que cuando llegó a Birmingham por prime-

ra vez, en 1814, todas las máquinas se hacían a mano; en la época en que leía su discurso, sin embargo, «se hace todo por medio de máquinas-herramienta con una precisión que la sola mano del hombre jamás podría alcanzar». En menos de un siglo se había asistido a una revolución de los métodos de trabajo en uno de los más importantes centros industriales de Inglaterra.

Antes de pasar a considerar las máquinas-herramienta en particular, quizá sea útil examinar los principios en que se basa su funcionamiento. Hablando en términos generales, sólo hay dos formas de movimiento, el rectilíneo y el circular, que se pueden obtener fácil y correctamente con mecanismos de relativa simplicidad. La mayoría de las máquinas-herramienta trabajaban aplicando uno u otro de estos movimientos, o una combinación de ambos, estando firmemente sujeta bien la máquina o bien la pieza sobre la que se trabajaba. El barro, por ejemplo, toma forma en la rueda de alfarero a causa de su movimiento de rotación combinado con los movimientos ascendentes y laterales de la mano del alfarero, que desempeña un papel perfectamente comparable al desempeñado por la herramienta cortante de un torno. Un movimiento en espiral, necesario para realizar con exactitud la rosca de un tornillo, se puede obtener por medio de un movimiento

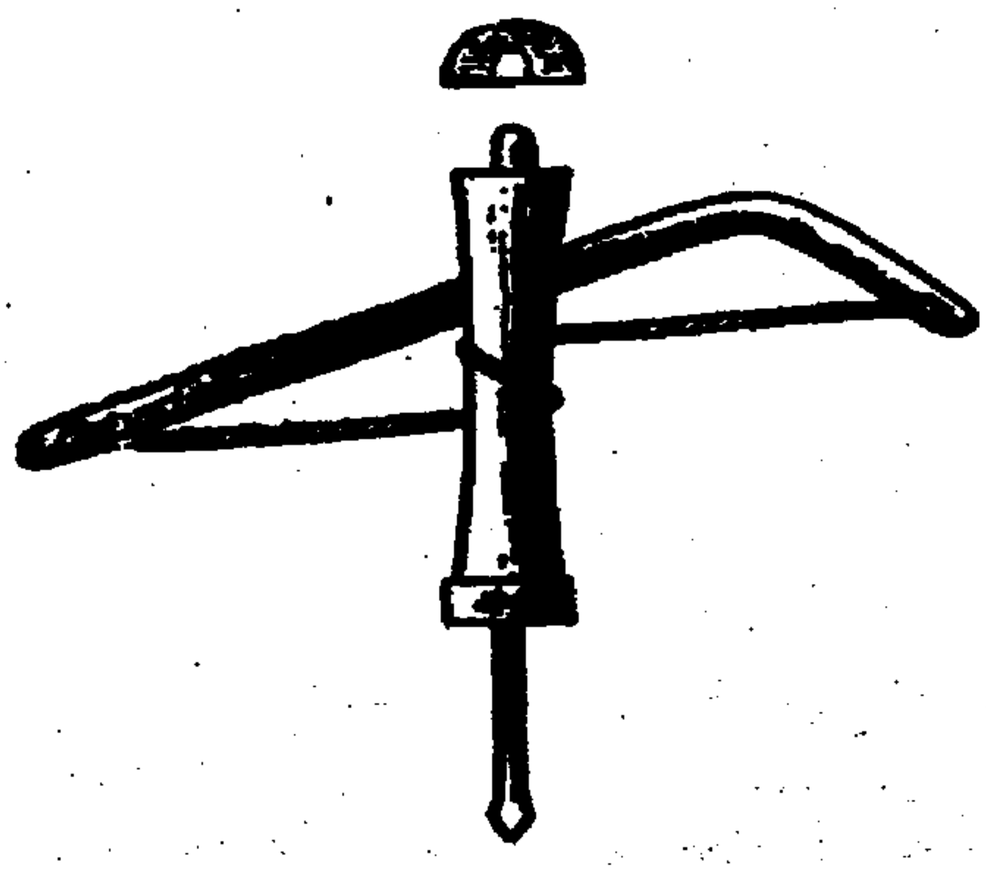


Fig. 156. Taladro de arco egipcio con broca de cobre. Alrededor de 1200 a. C.

circular y otro rectilíneo perpendicular a aquél, ejecutados simultáneamente: el grado de inclinación de la espiral se puede controlar variando la velocidad relativa de los dos movimientos. Una perforación se puede conseguir también por medio de la combinación de un movimiento rectilíneo y otro circular, penetrando el taladro al tiempo que gira. El cepillado, por el contrario, requiere sólo un movimiento rectilíneo.

Fig. 157. Tornillo de sujeción. Parte de un retablo del maestro Francke, 1424.

Muchas máquinas-herramienta no representan más que la mecanización de los métodos tradicionales de los artesanos para darles mayor precisión y, a medi-

da que el metal sustituye a la madera, mayor fuerza. La taladradora mecánica, por ejemplo, es un descendiente del taladro de arco de los carpinteros egipcios (fig. 156); y el tornillo de sujeción, aunque no se sabe con seguridad que existiese hasta el siglo xv d.C. (figura 157), posiblemente fuese conocido, sin embargo, por los asirios. El cepillo de carpintero nació como un instrumento manual en tiempo de los romanos (fig. 158): aunque parece que cayó en desuso después, hasta el siglo XIV, era sustancialmente igual al que se utiliza hoy, salvo que el armazón es ahora, por lo general, de hierro en lugar de madera. Dado que en mecánica es preferible un movimiento rota-

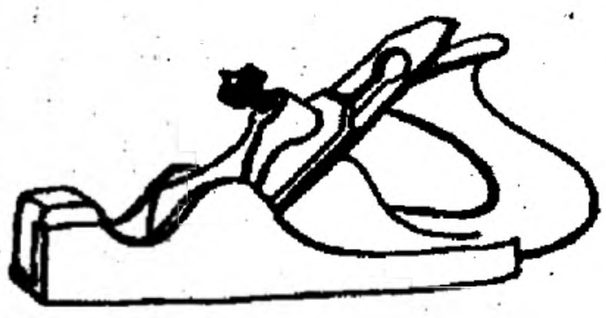


Fig. 158. Cepillos de carpintero: *arriba*, romano; *abajo*, moderno.

torio continuo para efectuar un trabajo sin interrupciones y a alta velocidad que un movimiento de vaivén, existió una tendencia a sustituir este último, en algunos instrumentos manuales, por un movimiento circular. De este modo las sierras circulares se empezaron a usar durante el tercer cuarto del siglo XVIII y las sierras de cinta a mediados del siglo XIX, en especial en los Estados Unidos, donde existía una gran demanda de toda clase de maquinaria para trabajar la madera: pero el principio en que se basaban —el de cortar por medio de una fricción continuada producida con un filo de agudos dientes— era el mismo que el de las sierras de sílex del Paleolítico superior o que el de las sierras de la Edad del Hierro en que se utilizaron por vez primera los dientes en forma de rastrillo.

EL AVANCE DEL TRABAJO DE PRECISION

El torno, la máquina-herramienta más antigua, tiene una edad incalculable, pero no se convertiría en un instrumento auténticamente eficaz para realizar un trabajo de precisión hasta los alrededores de 1700. Los relojeros, inspirándose en el trabajo de hombres como Hooke y Huygens, pusieron a punto por entonces los primeros tornos de precisión (fig. 159), que eran también muy utilizados por los fabricantes de instrumentos científicos. Estos tornos estaban montados sobre una barra rectangular de hierro que por

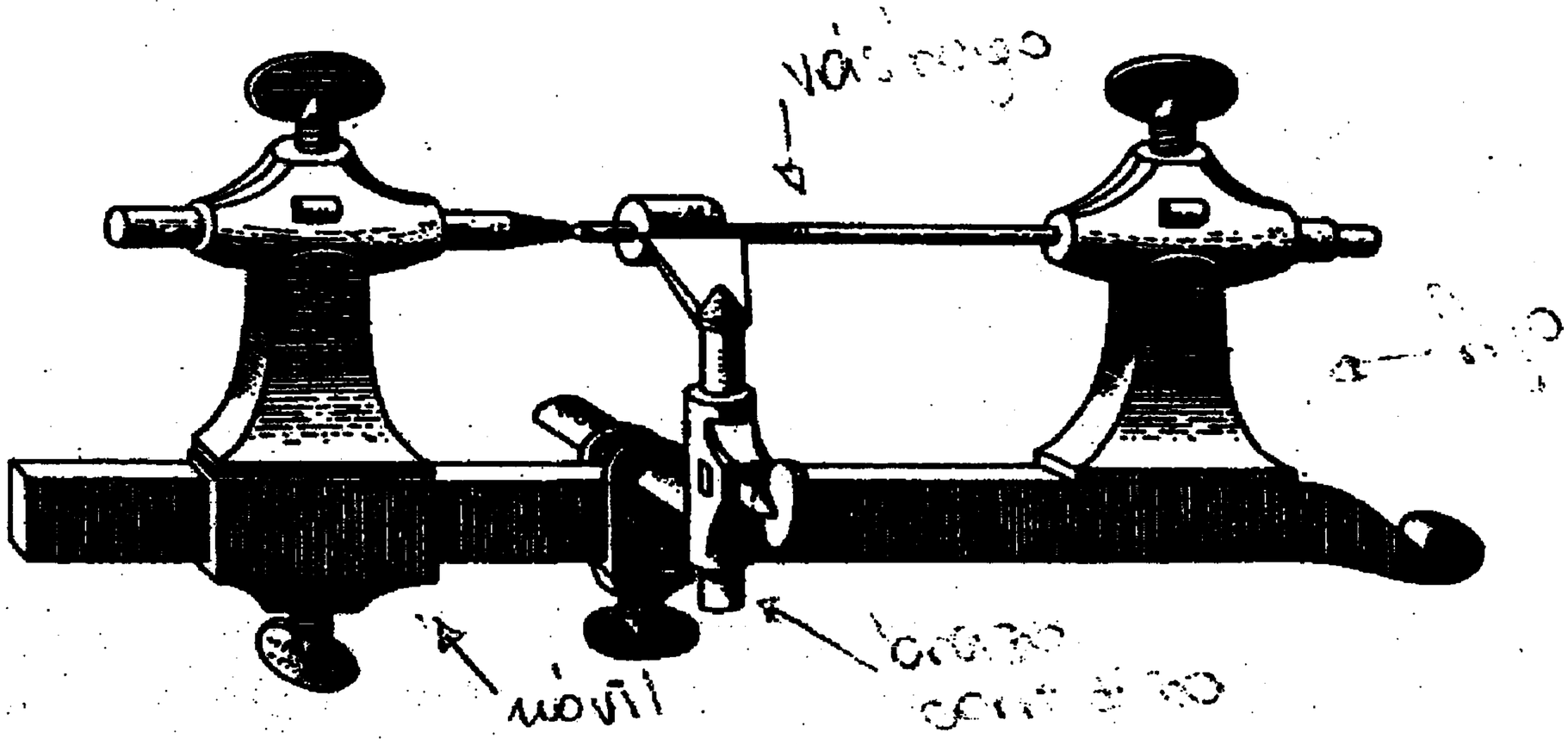


Fig. 159. Torno de relojero. Siglo XVIII.

lo general tenía dos cabezales, uno móvil y otro fijo, a través de los que pasaban unos vástagos que sujetaban el material sobre el que se iba a trabajar; entre dichos cabezales iba un brazo corredizo que sostenía la herramienta de trabajo. La pieza sobre la que se trabajaba giraba gracias a un arco, de forma que la rotación se producía primero hacia un lado y luego hacia el otro. Aunque este movimiento intermitente representaba una desventaja, con este método se podían hacer de modo satisfactorio las partes cilíndricas y los árboles de los relojes. Hacia 1750 el francés Antoine Thiout introdujo la importantísima innovación de equipar el torno con un portaherra-

mientas, movido longitudinalmente por un eje roscado. Como consecuencia de ello, la exactitud del trabajo realizado dejó de depender por completo de la vista y el pulso del obrero. En una fecha desconocida entre 1768 y 1780 otro inventor francés, Jacques de Vaucanson, experto en el campo de la maquinaria textil, diseñó un torno y un taladro, cada uno de los cuales iba provisto de un portaherramientas movido por un tornillo roscado. También fue él quien primero utilizó lo que luego se generalizaría a todas las máquinas-herramienta, esto es, hacer que el portaherramientas se moviese a lo largo de una bancada prismática de metal. Ello formaba parte de un movimiento general hacia la obtención de una mayor resistencia y rigidez que daría como resultado, entre otras cosas, la sustitución de la madera por el metal como material de construcción de este tipo de maquinaria.

La mecánica de precisión y la fabricación de máquinas-herramienta contribuyeron en gran medida a la construcción de tornos de roscar. Los tornillos con rosca bien trazada eran muy importantes para una gran variedad de propósitos, como, por ejemplo, para mover los portaherramientas, ya que a cada giro del tornillo debía corresponder con mucha precisión un movimiento de avance lineal determinado. Los tornillos de rosca relativamente ancha se podían hacer con bastante exactitud usando terrajas, pero para tornillos largos y con una rosca muy fina —como los que se requerían para el exacto ajuste de los micrómetros— era esencial el uso del torno. Los primeros tornos de roscar plenamente satisfactorios fueron construidos por el fabricante de instrumentos inglés Jesse Ramsden en 1770. En la más complicada de las dos máquinas que construyó (fig. 160), la pieza que había que roscar se colocaba paralelamente a la guía del portaherramientas y giraba por medio de un engranaje que unía a éste con la manivela que movía el tornillo principal de avance. Partiendo de un original muy pequeño se podían hacer tornillos

de gran tamaño, cortados a mano cuidadosamente con una lima según un diseño geométrico; la precisión en el resultado dependía en gran medida del cuidado y habilidad del operario. La fabricación de tornillos era un oficio altamente especializado, pero a finales del siglo XVIII funcionaba ya un cierto número de talleres que hacían trabajos de gran calidad, la mayoría de ellos en Francia e Inglaterra. Por supuesto, no se necesitaba una gran exactitud cuando se trataba de tornillos y tuercas usados simplemente para mantener ensambladas las distintas partes de una máquina.

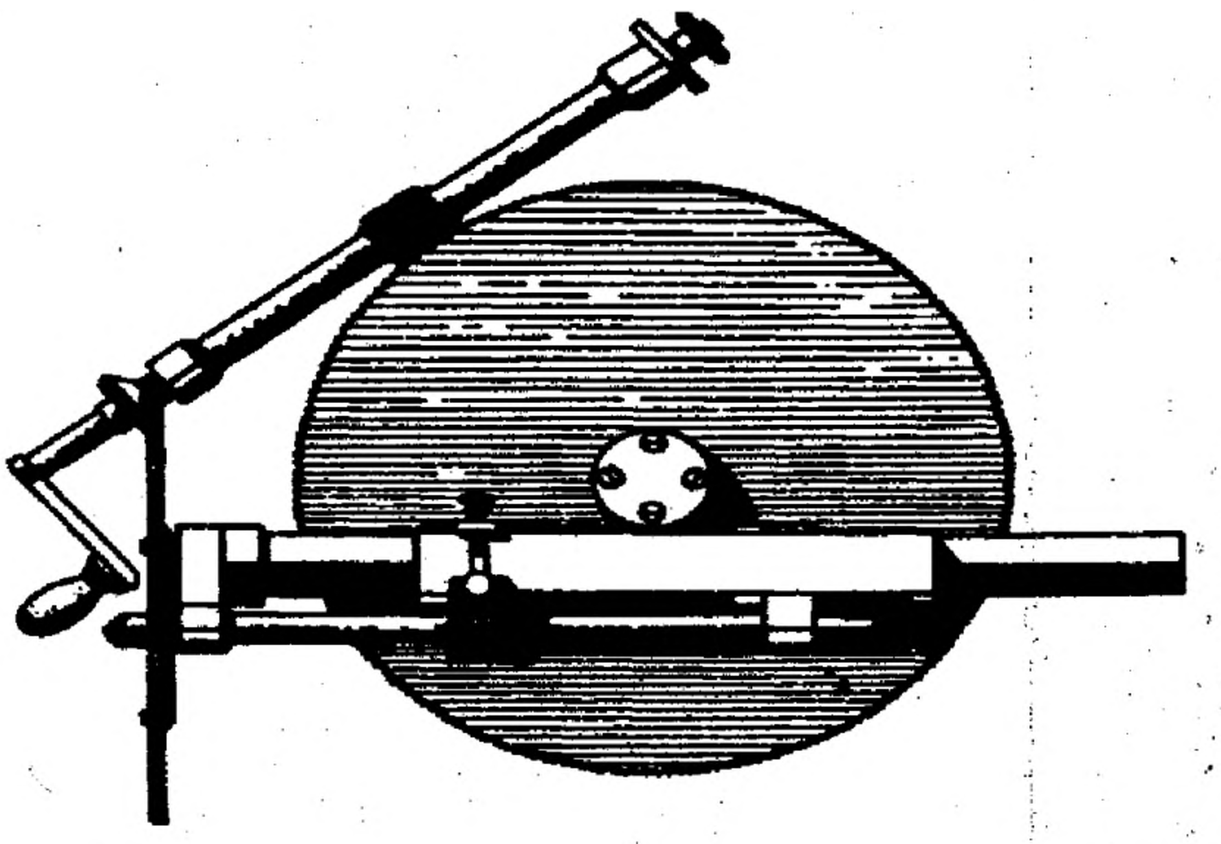


Fig. 160. Torno de roscar. Siglo XVIII.

La obra de Ramsden tuvo consecuencias mucho más importantes. En 1797, por ejemplo, Maudslay diseñaba un torno de roscar de gran tamaño, muy usado por los mecánicos de entonces, para el que probablemente se inspiró en el modelo de Ramsden, del que en distintas ocasiones se había publicado la descripción. Dos años antes Senot, en Francia, había construido un torno para roscar con precisión, pero parece que no atrajo demasiado la atención de sus contemporáneos. También en Francia Jean Fortin desarrolló un método muy preciso para roscar, pero se sabe muy poco acerca de él, excepto que trabajaba con un método de aproximaciones sucesivas.

Al mejorar la precisión se creó también una cre-

ciente necesidad de escalas, tanto lineales como circulares, graduadas con exactitud, para instrumentos tales como reglas, sextantes, círculos murales para observatorios, etc. Con este objetivo se construyeron máquinas divisoras basadas en principios geométricos. El hecho de que se pudiese disponer de tornillos roscados con exactitud, que se acoplaban a engranajes igualmente ejecutados con precisión, hacía posible controlar los movimientos del punzón que marcaba las divisiones de la escala. En este terreno, el duque de Chaulnes hizo un notable trabajo de iniciación introduciendo el uso de microscopios con una trama capilar dentro del campo de visión para la precisa localización de las divisiones en la plancha maestra; utilizó también el mecanismo de transmisión por tornillo tangente. En las experimentadas manos de Ramsden estos métodos demostraron ser de mucho valor, y fue el propio Ramsden quien construyó la primera máquina divisora capaz de trabajar a escala industrial. Sus máquinas despertaron un gran interés, y a principios del siglo XIX se construyeron muchas de tipo similar. En el continente, Lenoir realizó trabajos de excepcional exactitud, pero quizá el constructor de instrumentos de precisión de más éxito en aquel entonces fuese Henry Gambey. Su máquina divisora era más exacta que ninguna de las que la habían precedido: en 1840 la utilizaría para graduar un gran círculo mural de dos metros de diámetro para el observatorio de París, que permanecería en uso hasta 1920. Entre sus refinamientos se hallaba el uso del control remoto, de forma que se evitaba la dilatación del metal producida por el calor corporal del operario.

El rápido desarrollo de métodos para construir instrumentos de precisión de toda clase durante la segunda mitad del siglo XVIII y primera mitad del siglo XIX tuvo consecuencias prácticas de gran trascendencia. La construcción de relojes, que había sido la que había dado el impulso inicial, logró un gran triunfo en 1759 cuando John Harrison terminó su cronó-

metro número 4, del tamaño de un reloj de bolsillo. Esto permitió que la longitud terrestre pudiese ser medida con un error máximo de medio grado, lo que haría que su diseñador ganase el premio de 20.000 libras —la magnitud de la recompensa es una clara indicación de la enorme importancia que un cronómetro exacto tenía para los navegantes— que el Board of Longitude había ofrecido en 1714 al inventor de un cronómetro marino capaz de alcanzar este grado de precisión en el mar. Sin embargo, Harrison sólo hizo en total cinco cronómetros, y el hombre que creó el moderno cronómetro marino sería un suizo, Ferdinand Berthoud. Con el sobrino de Berthoud la manufactura de cronómetros marinos se industrializó en Francia durante la primera mital del siglo XIX. En Inglaterra los mejores modelos eran los fabricados por Mudge, Arnold y Earnshaw. Al final de las guerras napoleónicas los navegantes tanto ingleses como franceses iban ya provistos de un medio para determinar a plena satisfacción la longitud geográfica en el mar. También el sextante había empezado a ser usado a partir de 1757 como ayuda para la navegación, y las necesidades planteadas por su fabricación habían añadido un impulso adicional a la invención de la máquina divisora. Grandes telescopios de reflexión trazaban la carta de los cielos, y en la topografía se lograba cada vez mayor precisión. Cuando los trabajos de triangulación de ingleses y franceses se unieron a través del estrecho de Dover en 1787, los franceses estaban alcanzando resultados muy exactos por medio del círculo repetidor, fabricado por primera vez por Lenoir. En Inglaterra, por esas mismas fechas los instrumentos de topografía más precisos existentes eran dos teodolitos de gran tamaño, construidos por Ramsden, que tenían una precisión de un segundo a 16 kilómetros o de dos segundos a 112 kilómetros. Se siguieron usando teodolitos de menor tamaño y de un tipo similar a lo largo de todo el siglo XIX.

De este modo el desarrollo de máquinas-herramienta de precisión para la construcción de instrumentos científicos afectó profundamente al arte de la navegación como al levantamiento de cartas y mapas en el preciso momento en que tenían lugar los grandes viajes de descubrimiento de los siglos XVIII y XIX. Y lo que es no menos importante, abrieron el camino para las máquinas-herramienta industriales esenciales para la construcción de los últimos modelos de máquinas de vapor y de la maquinaria que ponían en movimiento. Los instrumentos topográficos de precisión eran también necesarios para la construcción de canales, carreteras y líneas férreas. La importancia de estas conexiones entre ciencia y tecnología, a través de los fabricantes de instrumentos, no siempre ha sido apreciada lo suficiente.

LA HERENCIA DE LOS INICIADORES

Visto el profundo efecto que tuvo en el desarrollo de la máquina de vapor de Watt, es de lamentar que el único resto que nos quede de la taladradora original construida en 1775 por John Wilkinson, en lo que habían sido las herrerías de su padre en Denbighshire, sea una barra de taladrar de 4,5 metros. Esta barra hueca era, sin embargo, la parte esencial de la máquina. Iba unida a la gran rueda de transmisión por uno de sus extremos y sostenida por un cojinete por el otro extremo; el cabezal de corte iba montado sobre la barra, con la que giraba, y era movido hacia adelante por un vástago montado en el interior de la barra de taladrar, mientras que el cilindro era sostenido en posición rígida sobre su cuna. Aunque su taladradora horizontal fue diseñada originalmente para hacer cañones, Wilkinson tuvo durante unos veinte años un virtual monopolio de la manufactura de cilindros para Boulton y Watt. Aun a mediados del siglo XIX no se habían introducido en su diseño muchas modificaciones (fig. 161).

El siguiente personaje de importancia en el desarrollo de las máquinas-herramienta industriales fue Joseph Bramah, hijo de un granjero de Yorkshire convertido en versátil inventor. Entre sus dieciocho patentes, que incluyen un inodoro perfeccionado (página 619), una prensa hidráulica, una cepilladora para madera, el sistema de aspiración de la cerveza y un aparato para imprimir los números de serie de los billetes de banco, había un tipo de cerradura que todavía se sigue manufacturando; una de estas cerra-

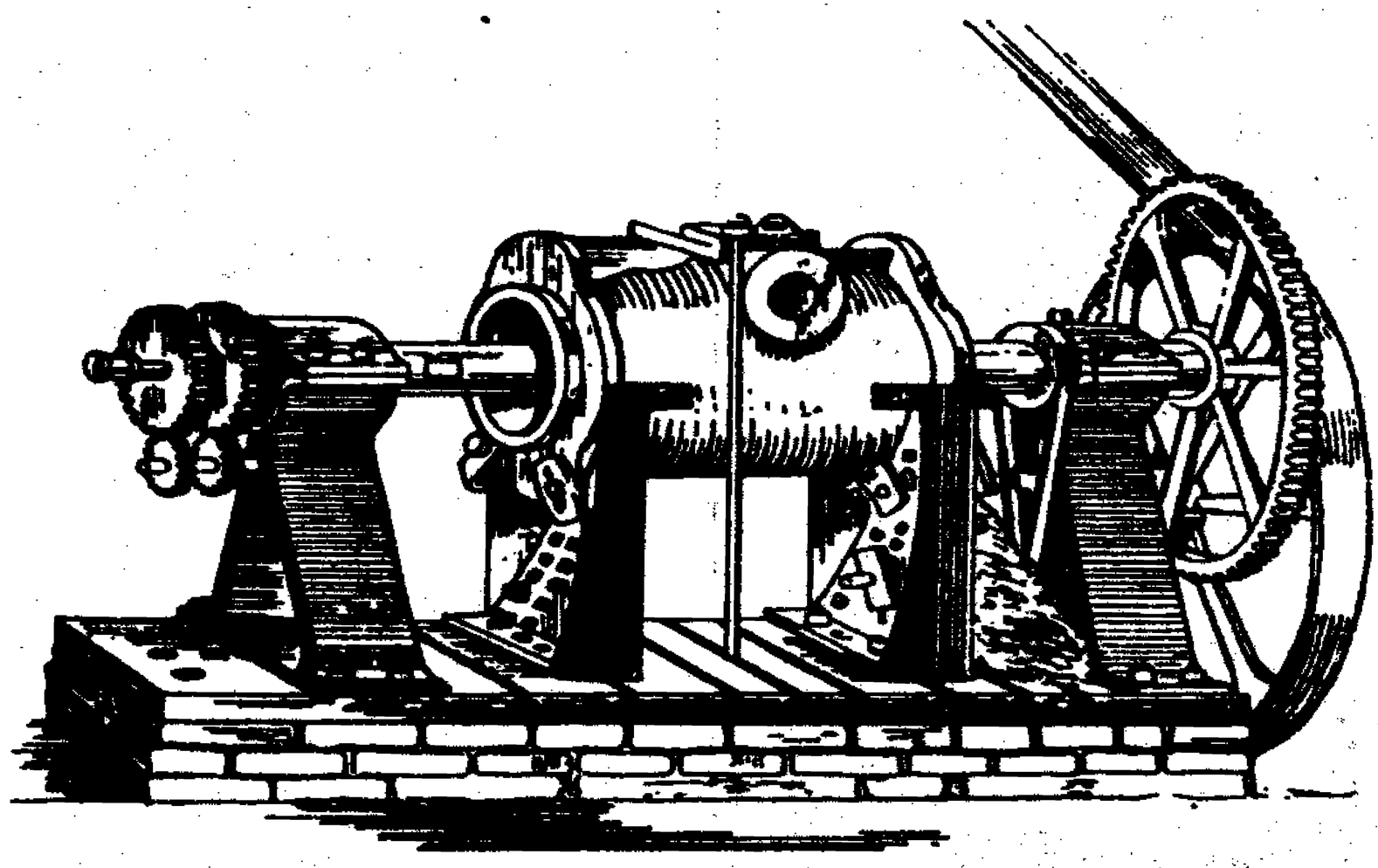


Fig. 161. Taladradora de cilindros para locomotoras, que funcionaba en los talleres de la Great Western Railway, en Swindon, 1851.

duras permaneció sin ser abierta [*unpicked*], a pesar del desafío que representaba una oferta de 200 guineas para quien lo lograse, desde 1784 hasta 1851, fecha en que el éxito de un visitante americano de ágiles dedos —que empleó cincuenta y una horas a lo largo de dieciséis días para culminar su trabajo— sería aclamado por la revista *Punch* como «lo mejor de la exposición» [*the pick of the Exhibition*]. Un tipo tal de cerradura tenía que ser necesariamente complicado, y hubieron de diseñarse máquinas para cortar estrías en el tambor de la cerradura, muescas

en las llaves y muescas en las guías de acero que servían para abrirla. Además de todo eso, Bramah construyó una máquina para enrollar muelles en espiral, en la que un tornillo de avance accionado por engranaje hacía posible la manufactura de muelles de diversos pasos. Esta fue la precursora de la máquina de roscar fabricada por Maudslay, un joven herrero del arsenal de Wollwich, donde había empezado a trabajar como barrenero a la edad de doce años, y al que Bramah había empleado como capataz. Al encontrarse con que su habilidad era recompensada con una paga que nunca pasó de 30 chelines a la semana, en 1797 Maudslay fundó su propia firma, de importancia tanto por las máquinas que fabricó como por los cerebros que en ella se forjaron.

Maudslay fijó nuevos niveles de precisión, debido en parte a que sólo usaba metales como material de construcción (las máquinas-herramienta que había fabricado para Bramah tenían bastidores de madera) y en parte a que obligaba a sus trabajadores a comprobar todas las superficies planas importantes —especialmente las de las correderas para máquinas de vapor— bajo estrictas normas de precisión. Fue el primero en popularizar entre los ingenieros el uso del portaherramientas, ya familiar entre los fabricantes de instrumentos, como acabamos de ver, para sujetar una herramienta móvil. Luego, en 1800, produciría su famoso torno de roscar. Este torno tenía un tornillo de avance, como en la máquina de tornear husillos de reloj, unido al cabezal principal por medio de ruedas dentadas fijadas sobre tres husillos; el portaherramientas circulaba sobre barras de forma prismática. Tornos similares habían sido de hecho diseñados en Francia y en América unos pocos años antes, pero el invento es comúnmente atribuido a Maudslay, en parte debido sin duda a su excepcional interés por la ejecución y reproducción de roscas de tornillo bien hechas. Su micrómetro de tornillo para trabajo de banco permitía obtener errores inferiores a 0,0001 centímetros.

La firma de Maudslay, Sons and Field, se convirtió en una importante constructora de máquinas de vapor fijas y para la navegación, pero el primer pedido importante que tuvo Maudslay fue de máquinas-herramienta para el arsenal de Portsmouth. Sir Samuel Bentham, hermano menor de Jeremy Bentham, el filósofo político, había obtenido en 1793 una patente sobre toda clase de maquinaria para trabajar la madera, con la que se proponía reducir los costes en los Astilleros Reales bajo su cargo como Inspector General de Fábricas Navales. Para mecanizar la manufactura de cuadernales, de los que el Almirantazgo necesitaba unos 100.000 al año, Bentham se basó en el diseño de una maquinaria superior a la suya propia, realizado por M. I. Brunel, refugiado monárquico de la Marina francesa. El proyecto, adoptado oficialmente en febrero de 1802, tardaría en completarse cinco años y medio. Como se necesitaban cuadernales de tres tamaños, algunas de las máquinas para aserrar, taladrar, entallar y acanalar tenían que ser fabricadas en más de un tamaño; en total eran cuarenta y tres máquinas, que realizaban todo el largo proceso de transformar los troncos de olmo en cuadernales terminados, excepto el último ajuste y el pulimento. Movidas por una máquina de vapor de 30 cv, las máquinas hacían 130.000 cuadernales al año, con lo que se redujo la mano de obra de 110 hombres especializados a 10 hombres sin especializar y se ahorró al Almirantazgo casi un tercio del desembolso de capital anual. Este ejemplo de métodos de producción en serie, que fueron también extendidos a Chatham y a los astilleros del Estado en España, estaba muy por delante de su tiempo, y algunas de las máquinas que Maudslay construyó para Portsmouth siguieron en uso durante más de un siglo después de su muerte, ocurrida en 1831.

Maudslay ejerció una influencia perdurable sobre la industria británica de construcción de máquinas-herramienta. De los tres grandes fabricantes de máquinas-herramienta de la siguiente generación, tanto

Richard Roberts como Joseph Whitworth habían trabajado durante un breve período de tiempo bajo sus órdenes, mientras que James Nasmyth, el más importante de los tres, había sido su ayudante personal cuando ya era muy mayor y no abriría sus propios talleres hasta después de la muerte de Maudslay. Roberts, que había trabajado también para Wilkinson en las herrerías de Bradley, construyó en 1817 un torno dotado de un cabezal con contramarcha, y el mismo año hizo la primera acepilladora para metales, que todavía sigue en funcionamiento. Cuando se empezó a usar unos pocos años más tarde una máquina de un tipo un poco mayor, su constructor fue otro antiguo empleado de Maudslay, Joseph Clement. Durante diez años la máquina de Clement fue la única en el mundo capaz de trabajar una superficie de hasta 0,5 metros cuadrados: fue tal su demanda que se convirtió en su principal fuente de ingresos, capaz de producirle más de 20 libras diarias. Roberts es más conocido por su máquina de hilar intermitente (selfactina), pero inventó además otras muchas máquinas-herramienta, entre las que se incluye una punzonadora diseñada especialmente en 1847 para hacer los agujeros de los remaches del puente del ferrocarril sobre el estrecho de Menai, en Gales.

Nasmyth, hijo de un paisajista escocés, llegó a ser ayudante personal de Maudslay cuando solamente tenía veintiún años. Entre sus inventos se encuentra una fresadora y una acepilladora o limadora, bastante distinta de la usada por Brunel para la construcción de cuadernales; la limadora podía producir cualquier tipo de superficie de tamaño reducido compuesta por elementos rectilíneos. Pero Nasmyth es más conocido por su martillo pilón de vapor, que podía levantarse a mayor altura que el antiguo martinete de forja y bajar con gran fuerza pero perfectamente controlado. Fue diseñado en 1839 para resolver los problemas prácticos creados por la oferta, que luego no sería confirmada, de equipar el vapor

Great Britain con un eje para las ruedas de paletas de 0,75 metros de diámetro. En el martillo pilón de vapor el pistón de un cilindro situado en la parte superior de la máquina está conectado con la maza o pilón por medio de un vástago, siendo levantada esta maza antes del golpe por medio de la admisión de vapor en el cilindro. Más tarde se lograría aumentar la fuerza del golpe admitiendo vapor por encima del pistón al efectuar éste el movimiento descendente, para conseguir así un doble efecto (fig. 162). A

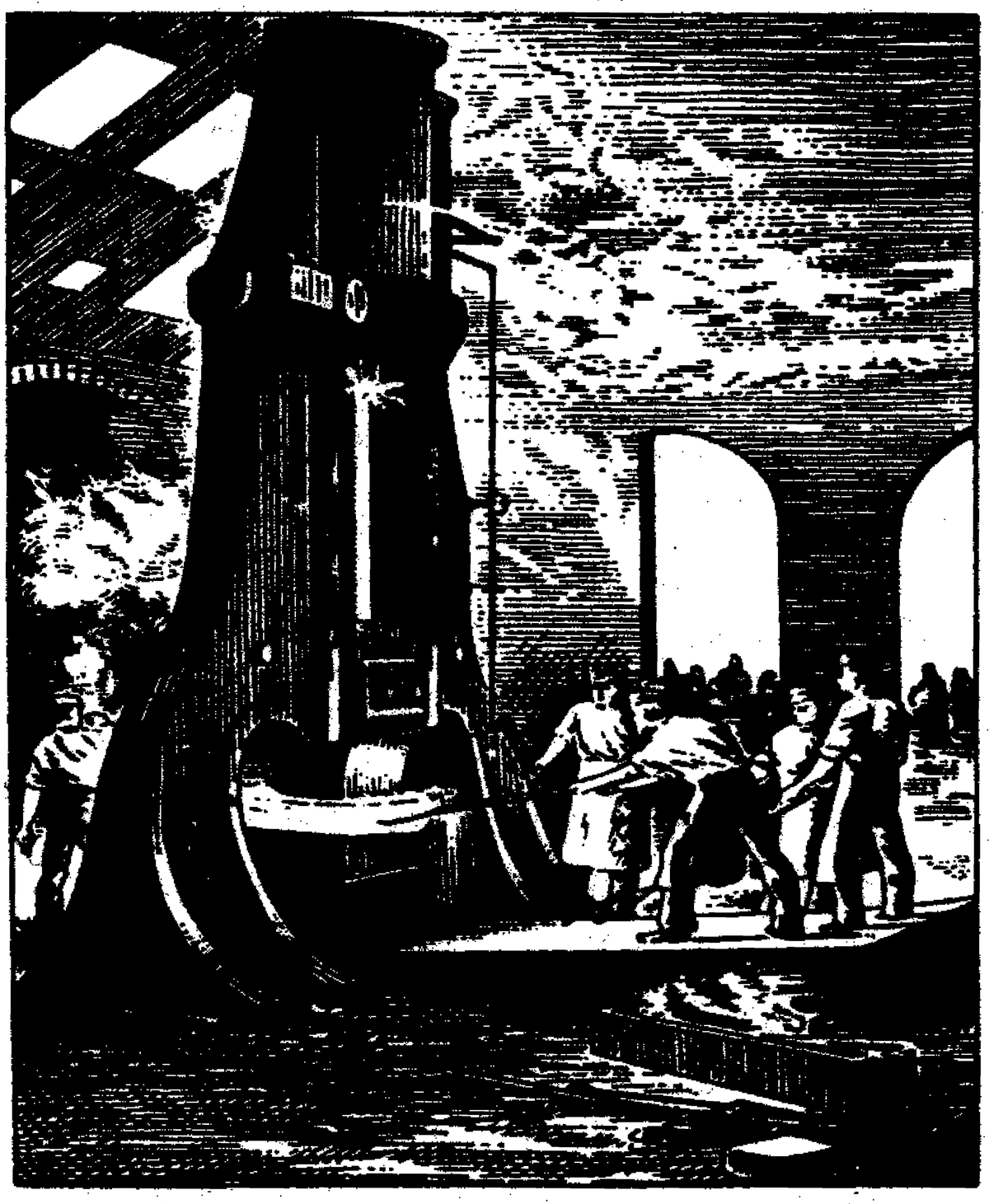


Fig. 162. Martillo pilón accionado por vapor de Nasmyth.

partir de ese momento se pudieron forjar barras y chapas de hierro de mayor tamaño que el hasta entonces conseguido. Este gran martillo podía, sin embargo, descender —como señalaba el catálogo de la Exposición de 1851— «con sólo la fuerza suficiente para romper una cáscara de huevo». Para hincar pilotes, tal y como se requirió por ejemplo para la construcción del puente de Newcastle, realizada por Robert Stephenson en 1849, se llegaron a lograr rit-

mos de un golpe por segundo en lugar de un golpe por varios minutos, que eran los que se podían obtener cuando se usaban los métodos anteriores.

Whitworth, hijo de un profesor de instituto, se estableció como fabricante de herramientas en Manchester en 1833, con la intención de fabricar máquinas-herramienta para la venta. A este respecto se encuentra en abierto contraste con aquéllos a los que ya hemos hecho referencia, puesto que estos últimos fabricaron máquinas-herramienta en primer lugar como paso necesario hacia la manufactura de algún otro objeto en que estaban interesados. Como proveedor de herramientas se colocó muy por delante de todos sus rivales en las exposiciones de 1851 y 1862. Las veintitrés piezas que exhibió en el Palacio de Cristal incluían varios tipos de acepilladoras, una de las cuales era no sólo de acción mecánica y automática, sino que iba equipada con unas poleas de guía que daban la vuelta al portaherramientas al final de su recorrido, de forma que cortaba en ambas direcciones. Introdujo también una serie de mejoras en los tornos, incluyendo el diseño de una caja hueca para la bancada que proporcionaba mayor rigidez para un peso dado, a la vez que protegía adecuadamente al importantísimo tornillo de avance contra el polvo y las limaduras. Uno de sus primeros inventos, al que ya nos hemos referido, fue una máquina de medición que tenía una precisión de una millonésima de centímetro (fig. 163): esto contrastaba con los niveles de precisión de la época, aunque ya hemos señalado que el micrómetro de trabajo de Maudslay lograba una precisión de 0,0001 centímetros.

Otra vía más seguida por Whitworth para mejorar los métodos de trabajo mecánicos fue la normalización de las roscas de tornillos. Hasta 1760 la creciente demanda de tornillos había sido atendida por medio de la producción en fábricas, patentada por primera vez por J. y W. Wyatt. Whitworth, tras reunir todas las muestras de tornillo de todos los talleres ingleses que le fue posible, planteó sus dos pro-

puestas: que el ángulo entre los lados de la rosca fuese de 55° y que el número de aristas por pulgada se especificase según el diámetro. Sus recomendaciones se convirtieron en práctica generalizada en Inglaterra durante la década de 1860, pero en el continente la firme difusión del sistema métrico decimal impidió que tuviesen aceptación general, mientras que el gobierno de los Estados Unidos adoptaba oficialmente en 1868 el sistema rival de Sellers.

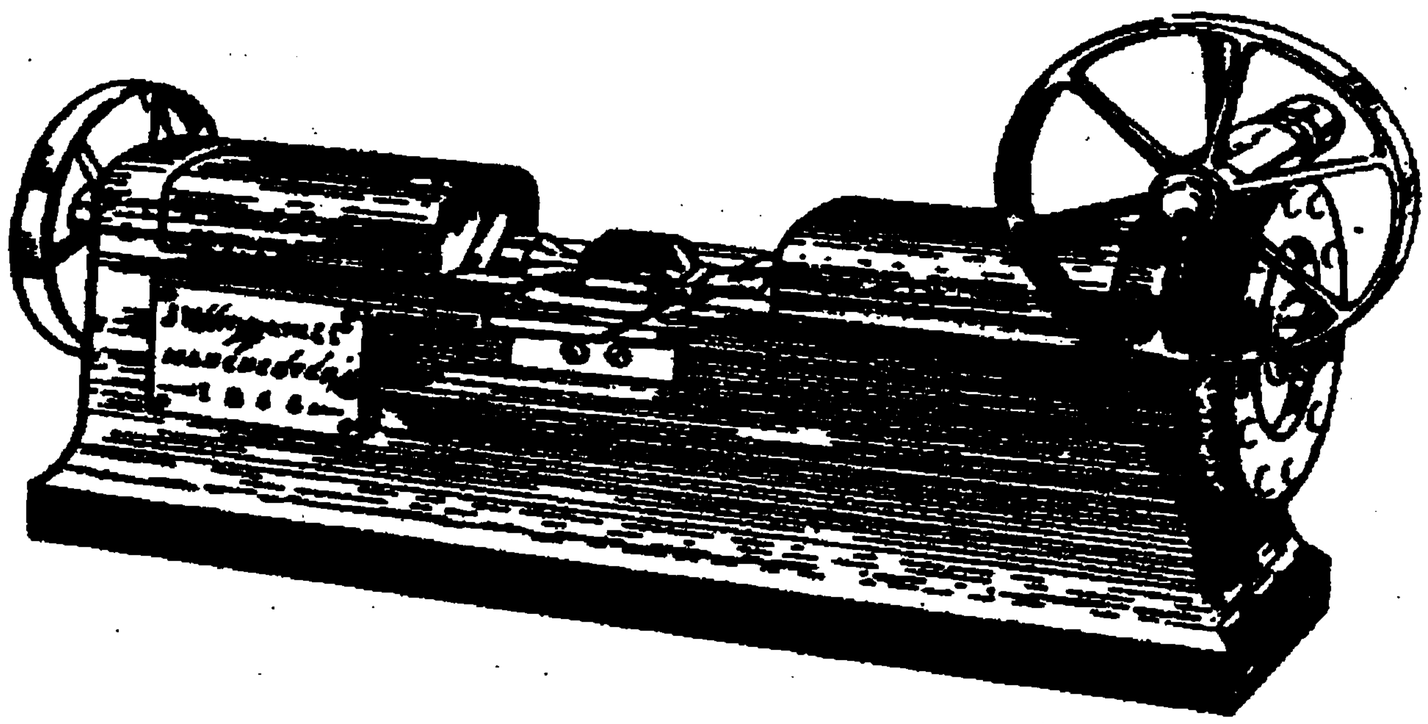


Fig. 163. Máquina de medición, de Whitworth, con una precisión de una millonésima de centímetro, 1856.

Al hablar de la gran dinastía de constructores de máquinas-herramienta ingleses desde Maudslay hasta Whitworth hemos hecho un especial hincapié en las máquinas usadas para trabajar hierro y otros metales, pero también se produjeron algunas nuevas máquinas importantes para trabajar tanto la madera como la piedra. Los americanos de la época de las cabañas de troncos tenían gran interés en toda clase de maquinaria para trabajar la madera, pero sin embargo la primera acepilladora rotatoria fue diseñada para el arsenal de Woolwich por Bramah en 1802; permaneció en uso a lo largo de medio siglo. En esta máquina la madera se movía hacia adelante y hacia atrás sobre unos carros por medio de una cadena sin fin y unos carriles de 12 metros de largo; por encima de todo ello colgaba un disco provisto de gubias y cepillos que se hacía girar por medio de una

máquina de vapor a 90 r.p.m. En 1827 fue diseñada por un antiguo empleado de Maudslay una máquina que convertía los tablones en tablas para solar pisos con lengüetas y ranuras en sus bordes.

Las máquinas para la reproducción de formas irregulares empezaron con el torno de copiar medallones del siglo XVIII. En las máquinas originales, un palpador obligaba a la cuchilla a hacer una copia invertida de la matriz, pero hacia 1800 el palpador y la cuchilla fueron montados en una barra que pivotaba en uno de sus extremos, de forma que se podía hacer una copia positiva de la matriz; la escala de la reproducción se podía variar ajustando la posición de los dos instrumentos montados sobre la barra. James Watt, tras haberse retirado de la vida activa en los negocios, introdujo una mejora en este sistema que consistía en añadir un brazo pivotante a la barra y en hacer girar las cuchillas de forma que fuese posible vaciar y copiar objetos en toda su superficie y en el mismo tamaño original o en diferente tamaño. Nunca llegaría a patentar ni a hacer públicos estos inventos, hechos entre 1804 y 1819, y en la década siguiente Benjamin Cheverton hacía independientemente el mismo invento.

Una aplicación práctica de este invento fue una máquina construida en Francia y usada en la casa de la moneda de París a partir de 1824 para convertir los diseños de medallones en troqueles. Otra fue una máquina que podía reproducir paneles labrados en madera o piedra blanda; inventada en 1845, fue muy usada para trabajos ornamentales en piedra y en particular para hacer los paneles del nuevo Parlamento, construido para reemplazar al destruido por el fuego en 1834. Pero quizá el tipo más significativo de torno de copiar fue el diseñado en 1818 por el inventor americano Thomas Blanchard. Fue construido para la fabricación en serie de cajas de fusil, y sería introducido en Inglaterra poco después de la Exposición de 1851 como parte del «sistema americano».

EL «SISTEMA AMERICANO»

La expansión de lo que se ha dado en llamar «sistema americano» —esto es, la mejora de la economía de la manufactura por medio de la producción de piezas totalmente intercambiables— es uno de los adelantos tecnológicos más sorprendentes de la segunda mitad del siglo XIX. En la gran Exposición de 1851 la mecánica inglesa tuvo la supremacía; el espacio reservado para los americanos ni siquiera se llenó. No obstante, entre los productos exhibidos por los americanos se encontraban una media docena de rifles manufacturados según el sistema de piezas intercambiables, y al cabo de dos años el sistema estaba siendo estudiado por un comité británico en que figuraban tanto Nasmyth como Whitworth. Este último apuntó la causa principal del desarrollo extraordinariamente rápido de la tecnología americana al decir: «Las clases trabajadoras son [allí] comparativamente poco numerosas, pero ello se ve compensado —y sin duda esto puede ser considerado como una de las causas principales— por la abundancia con que hacen uso de la maquinaria... en cualquier sitio donde ésta puede ser introducida, se acude a ella universalmente y de buena gana.»

Aunque este método es conocido como el «sistema americano» por ser Norteamérica el país en que fue más plenamente explotado, su punto de partida fue en realidad Europa, donde en un primer momento se hizo uso de él para la manufactura de mosquetes, de los que en el siglo XVIII los gobiernos eran compradores y manufactureros en gran escala con un interés especial en la uniformidad y en la facilidad de reparación. En 1785 Thomas Jefferson informaba desde París, donde había sucedido a Benjamín Franklin como embajador americano, de que un armero de esta ciudad hacía llaves para mosquetes compuestas de piezas totalmente intercambiables y que esperaba en consecuencia poder abaratar el coste de

los mosquetes. Correspondencia posterior muestra que el sistema fue extendido a la totalidad del arma. Algo similar parece haberse intentado en la Selva Negra en 1806, año en que Napoleón completó la ocupación de Alemania. Pero fue en América donde Eli Whitney, al no obtener beneficios de la desmotadora de algodón que había patentado en 1794, empezó la manufactura de mosquetes hechos de piezas intercambiables para el gobierno de los Estados Unidos según lo que equivocadamente creía ser «un método desconocido en Europa». Que América, con sus pocos armeros, era el terreno ideal para una evolución semejante se demuestra con el hecho de que el método propuesto por él fue imitado casi inmediatamente por Simeon North para la manufactura de pistolas. A partir de 1819 el sistema fue adoptado en los dos arsenales más importantes de los Estados Unidos. En el mismo período fue introducido este método en el mercado americano de relojes para la fabricación de un reloj de mesa producido por Eli Terry en grandes cantidades, cuyas ruedas eran acuñadas con mucha precisión por unos troqueles sobre planchas de latón. En 1828 se empezó la fabricación con este mismo método de una bomba rotatoria.

Las mejoras más sorprendentes del sistema, sin embargo, siguieron siendo introducidas en la manufactura de armas ligeras, en particular después de que la guerra con México de 1846-48 mostrase el considerable valor del revólver, inventado por Samuel Colt (p. 731) una década antes. En 1853 abrió una armería en que utilizaban 1.400 máquinas-herramienta. En la misma época la firma Robbins and Lawrence estaba ya produciendo rifles en serie, y fueron los productos exhibidos por ella en Londres en 1851 los que llevaron el «sistema americano» a Inglaterra, donde equiparon a la Real Fábrica de Armas Ligeras de Enfield con 150 máquinas-herramienta y el equipo auxiliar necesario. En 1857, en Enfield se producían 1.000 rifles a la semana, posteriormente 2.000, cada uno de los cuales requería más de 700 operaciones

distintas; todas las piezas de cualquier rifle eran absolutamente intercambiables, una ventaja militar cuya inmensa importancia no necesita ser subrayada.

En la segunda mitad del siglo XIX el posterior desarrollo del sistema de manufactura con piezas intercambiables (fig. 164), en el que Norteamérica seguía estando a la cabeza, fue uno de los factores principales que acabaron por poner en manos de todo el mundo una complicada y eficiente maquinaria tanto para propósitos pacíficos como para fines de guerra.

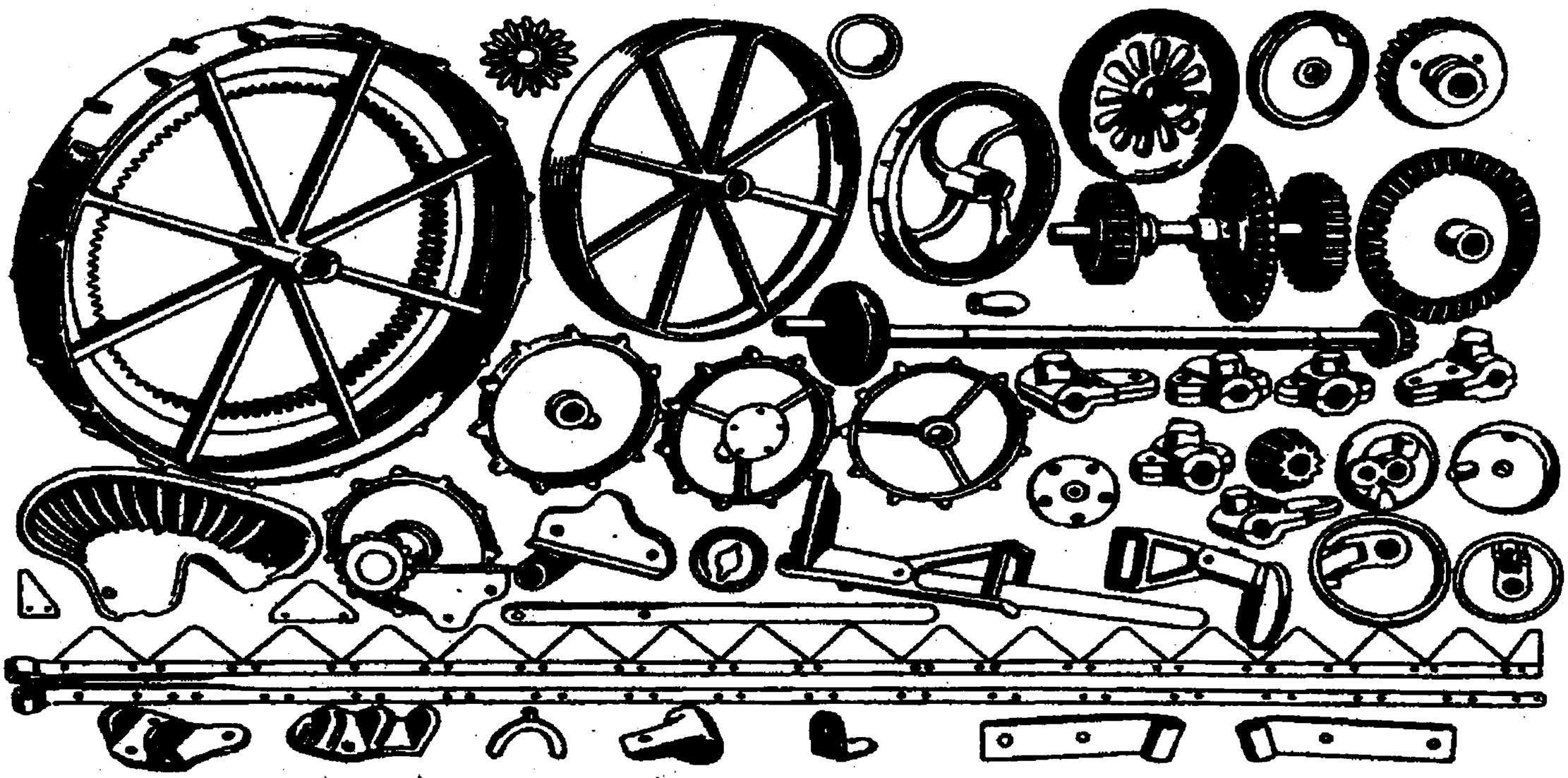


Fig. 164. Piezas intercambiables de segadoras usadas a mediados del siglo XIX.

Máquinas cosechadoras, máquinas de coser y de escribir y otros muchos tipos diversos de máquinas se difundieron desde la poco poblada América a los otros continentes para aliviar las fatigas físicas y, temporalmente, para complicar su economía.

EVOLUCION POSTERIOR (1850-1900)

En la primera mitad del siglo XIX un puñado de hombres, cuya experiencia industrial les había hecho darse cuenta de la gran necesidad de máquinas-he-

rramienta, hicieron y explotaron una serie de inventos de cardinal importancia. Durante la segunda mitad del siglo la demanda de nuevas máquinas originó el desarrollo de algunas nuevas máquinas-herramienta. El progreso derivó también de la disponibilidad de nuevos materiales para herramientas y nuevas fuentes de energía con que moverlas. No obstante, el progreso técnico en su mayor parte derivó de la mejora de los detalles de las herramientas ya en uso. Pero ya fuesen herramientas de nuevo o de viejo tipo, en este período asistimos a un declinar de la proporción de trabajo manual pesado usado en la industria y a una mayor preocupación por la seguridad y comodidad de quienes manejaban las máquinas. Las condiciones en que trabajaba incluso una firma tan emprendedora y moderna como Chubb, fabricantes en Londres de cerraduras y cajas fuertes, en 1868, hubiesen parecido atrasadas a finales de siglo (figura 165).

La vida útil de una máquina cortadora depende de la velocidad a que es movida; para las herramientas de acero al carbono de 1850, ello significaba una velocidad máxima de unos 12 metros por hora. El acero inventado por Robert Mushet alrededor de 1865, en el que se incorporaba wolframio y vanadio y se aumentaba la proporción de manganeso, permitía que se aumentase la velocidad en un 50 por 100. Esto a su vez dio lugar, ya a finales del siglo, al acero rápido que contiene cromo, que elevó la velocidad de corte a unos 36 metros por hora. Este cambio tuvo dos efectos sobre las máquinas-herramienta en uso. Eran necesarios una mayor resistencia, un mejor diseño y unos cojinetes perfeccionados para soportar el esfuerzo; al mismo tiempo, con la posibilidad de emplear velocidades muy altas, se hizo conveniente encontrar un método más eficaz para cambiar de velocidad que el que consistía simplemente en hacer que la correa de transmisión pasase por una polea de distinto diámetro. De acuerdo con ello, en 1892 se introdujo en América una caja de cambio para

Fig. 165. La factoría de Chubb and Son, en Londres, para fabricar cerraduras y cajas fuertes, 1868.

máquinas-herramienta que permitía seleccionar las velocidades por medio de una palanca de mano. El uso de la caja de cambio se extendió rápidamente, y hacia 1900 se había puesto también en uso un sistema de transmisión por fricción que permitía variar la velocidad del husillo a voluntad. Nuevos materiales —carburo de silicio (carborundo) y óxido de aluminio (alúmina)— se sumaron también durante la década de 1890 para revolucionar las máquinas pulidoras, que desempeñaban un importante papel, por ejemplo, en la manufactura de los componentes de las máquinas de coser.

A la larga, sin embargo, el cambio básico más importante fue la introducción de la electricidad como fuente de energía. De su aplicación a las máquinas-herramienta se hizo una demostración pública en la Exposición de Viena de 1873, y aproximadamente por

esas fechas empezó a sustituir al vapor para mover la red de correas de transmisión aéreas, característica por aquel entonces de la mayoría de las factorías. Al final del siglo, sin embargo, se podían encontrar ya en ocasiones motores eléctricos individuales incorporados en la estructura de las máquinas-herramienta, tal y como es ahora práctica general.

En América, durante la década de 1840, se introdujeron importantes mejoras en los tornos. Hacia 1855 las armas de la fábrica Robbins and Lawrence eran producidas con la ayuda de un torno revólver totalmente evolucionado (fig. 166). Aunque se ha dicho que había una patente inglesa de un torno revólver con torreta vertical obtenida antes de 1840, y que los adelantos americanos de la siguiente década deben ser atribuidos a emigrantes procedentes de Inglaterra, el torno revólver no puede ser localizado en la práctica de la mecánica británica ni incluso figuró en el catálogo de la Exposición Internacional en fe-

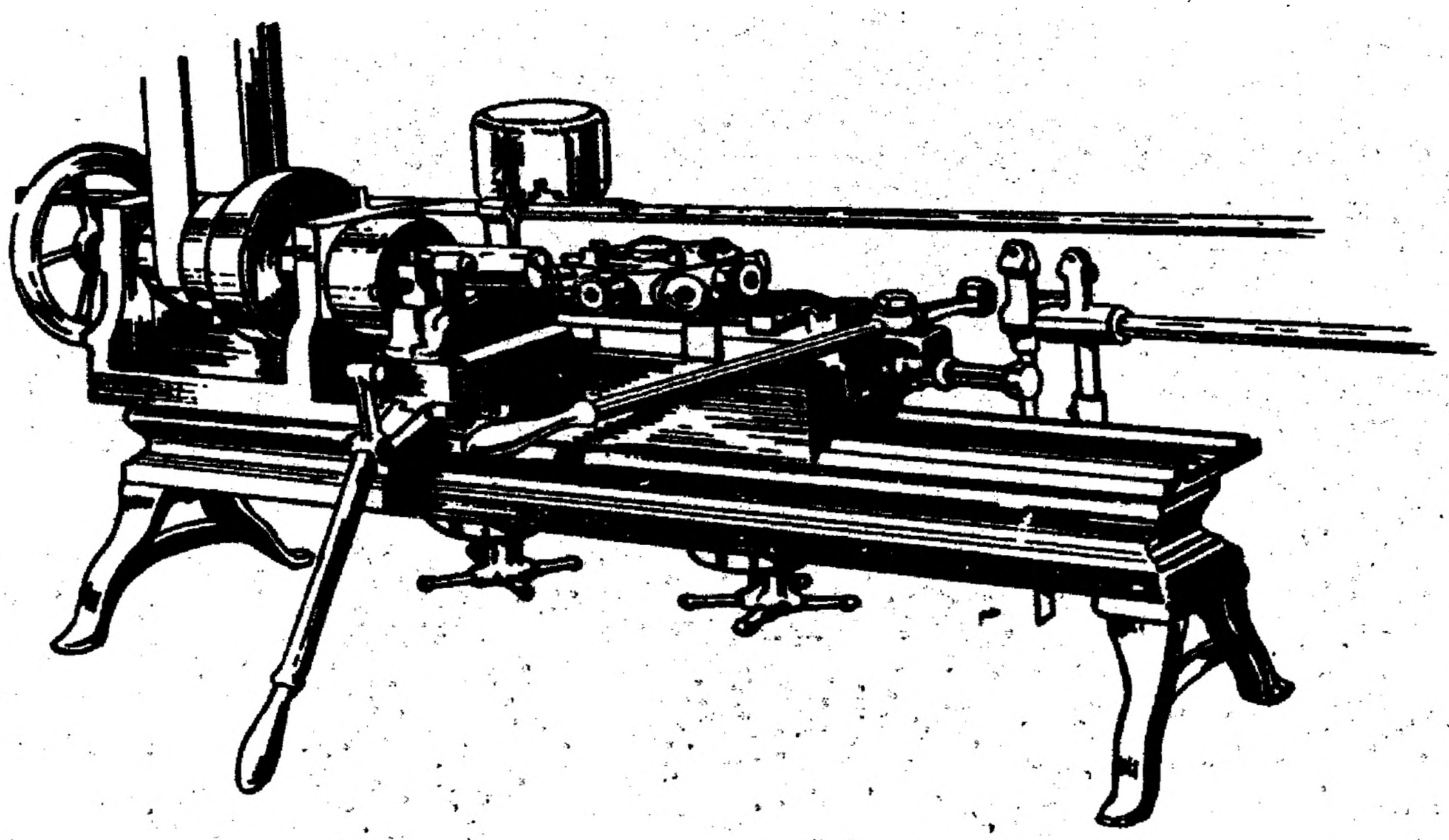


Fig. 166. Torno revólver construido por la compañía Robbins and Lawrence, Vermont, 1855.

cha tan tardía como 1862. Se podían colocar hasta ocho herramientas en la torreta octogonal del torno, torreta que podía girar para presentar cada una de las herramientas en la posición adecuada para su eficaz funcionamiento: de tal modo un solo operario podía llevar a cabo ocho operaciones mecánicas distintas. En la fecha de la declaración de la guerra civil americana en 1861 se había inventado un mecanismo de trinquete para hacer girar la torreta automáticamente, así como un sistema de suministro de las barras que había que trabajar, sin necesidad de detener la rotación del husillo.

Los años de guerra en Norteamérica estimularon en gran medida la demanda de una economía todavía mayor de mano de obra. Durante el tiempo de guerra fueron construidos tornos automáticos de roscar, que fueron pronto seguidos por un notable torno americano con levas cilíndricas conocidas como «ruedas sabias» (fig. 167). Las levas eran ajustables y con-

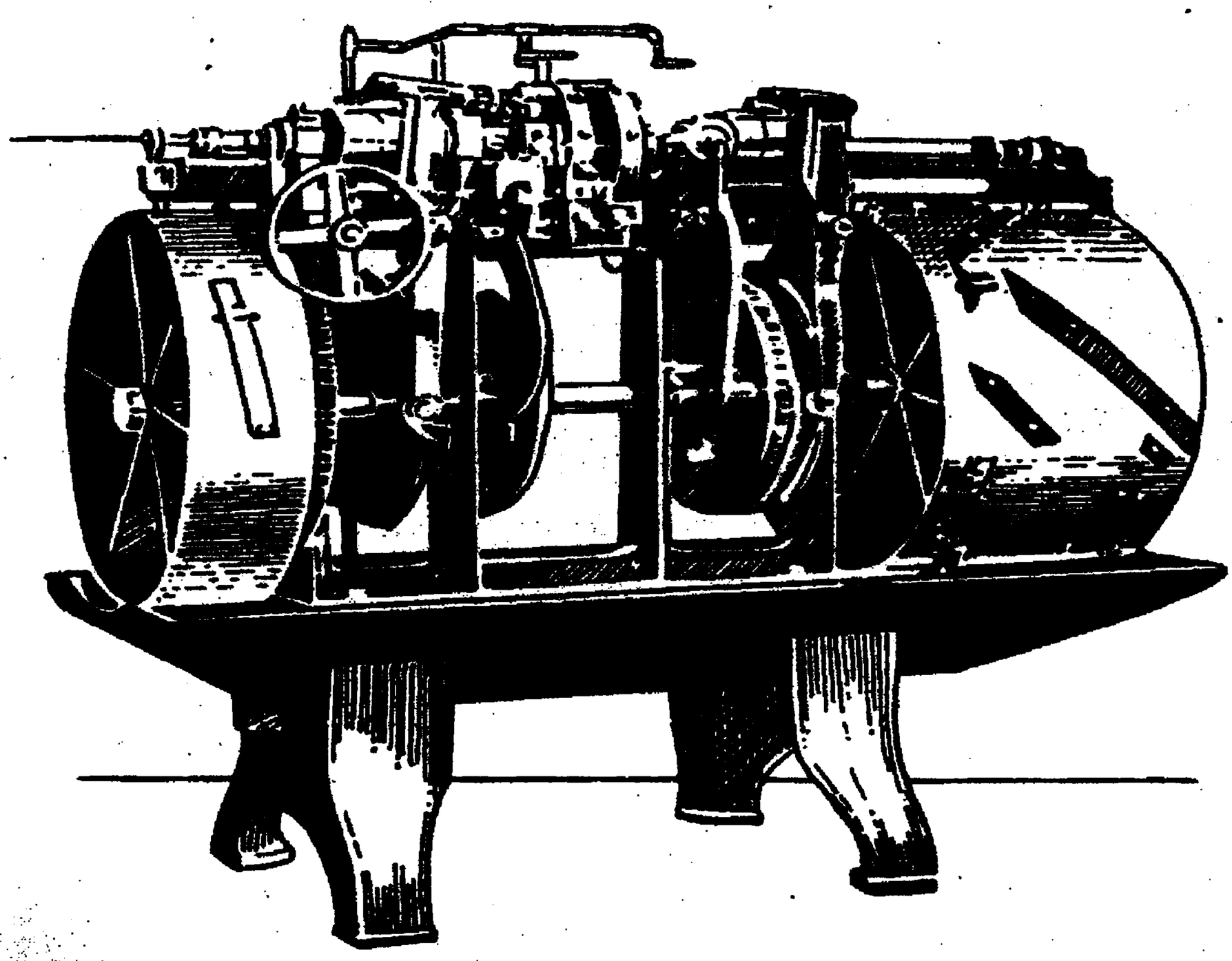


Fig. 167. Torno automático, de Spencer, con levas cilíndricas.

trolaban tanto las herramientas de corte como la torreta: si se le suministraba continuamente materia prima, esta máquina podía estar fabricando tornillos u otras piezas pequeñas mientras durasen las cuchillas. En 1879 siguió a esta máquina un torno automático de roscar inglés, que fabricaba tornillos de tres milímetros de diámetro a un ritmo de 80 a 150 por hora según su longitud; tenía incorporado un sistema de rodillos para suministrar material a la máquina. A finales de siglo las máquinas de este tipo habían aumentado de tamaño y potencia y eran de uso común: son los primeros ejemplos de lo que hoy se llama automatización.

En 1895 las necesidades de la industria americana de máquinas de coser fueron la causa de que el principio del torno automático fuese llevado un paso más hacia adelante. Poniendo cuatro o más husillos en un solo torno, y haciendo que girasen periódicamente a nuevas posiciones, se hizo posible elaborar todos los componentes de forma simultánea, aunque el tiempo total requerido venía determinado por el más largo de los cuatro procesos. En 1900 tales máquinas existían tanto en Suecia como en los Estados Unidos.

El mismo principio había sido aplicado anteriormente a la taladradora de husillos múltiples (figura 168). Una máquina diseñada según este principio fue usada en 1860 para perforar agujeros en una plancha de 16 milímetros de espesor usada en las vigas laterales del puente del ferrocarril de Charing Cross, en Londres. Pero no se había introducido ningún avance de mayor importancia en este tipo de taladradora, excepto la introducción de la broca salomónica, que hizo posible mayores velocidades, en la década de los sesenta. La mortajadora inventada por Nasmyth en 1862 fue una valiosa innovación: hasta la aparición de esta máquina, las muescas, tales como las que se necesitaban en los vástagos de los pistones y en las bielas, sólo se podían hacer por medio del laborioso proceso de taladrar una serie

de agujeros, haciendo saltar el metal entre ellos, y limando la ranura hasta que ésta alcanzaba la forma deseada. Nasmyth la calificó como «una de las tareas más aburridas y molestas a que podía dedicarse un mecánico», y, además, una tarea que sólo podía ser confiada a los hombres más preparados y hábiles.

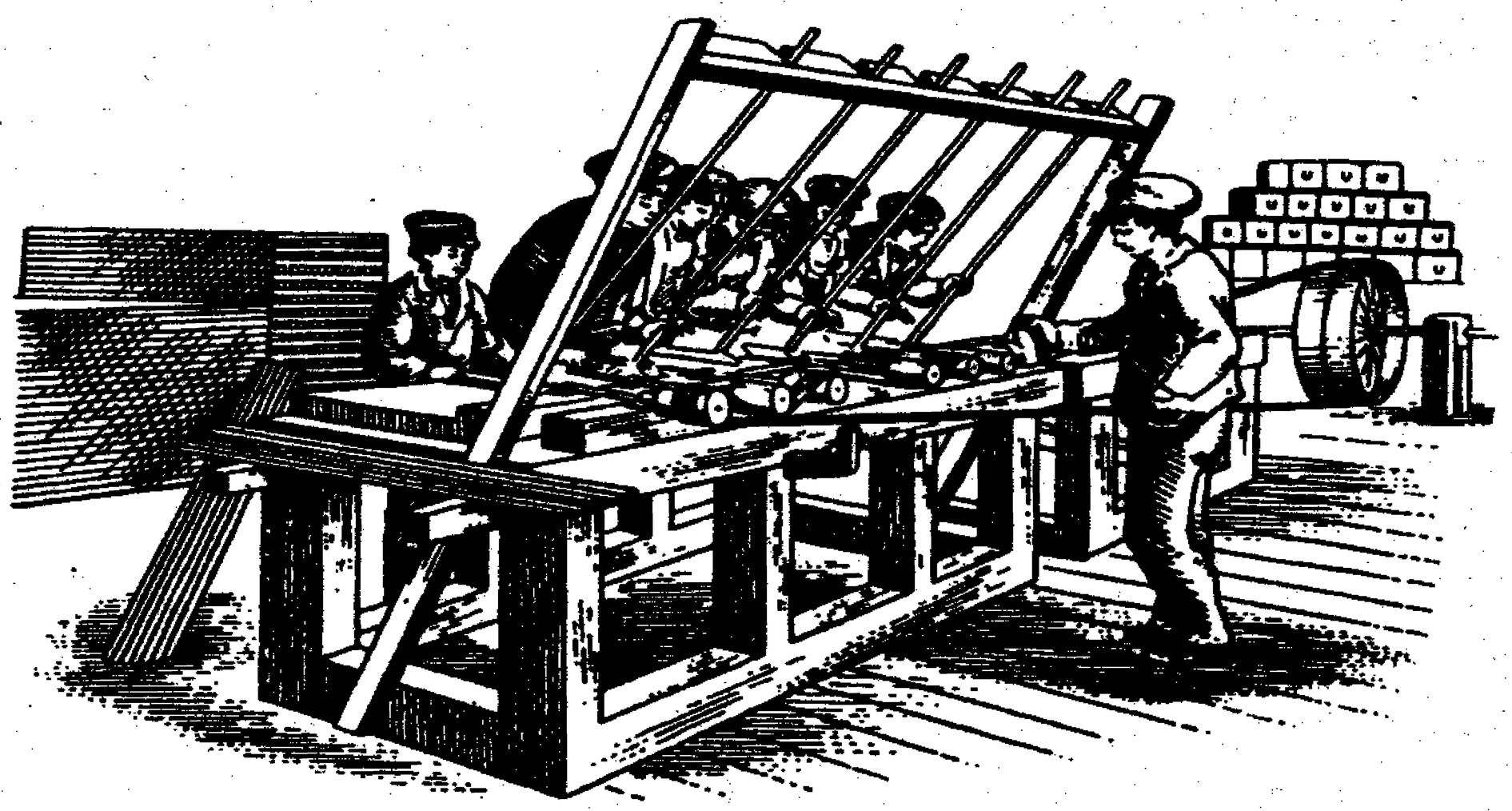


Fig. 168. Taladradora de husillos múltiples, 1851.

En las máquinas taladradoras, aparte de un aumento en el tamaño y la precisión, el cambio principal fue el creciente uso de la máquina taladradora vertical (fig. 169), porque en el caso de una pieza de gran tamaño era más fácil trabajar fijándola con abrazaderas sobre una plataforma rotatoria. Tales máquinas taladradoras verticales eran, no obstante, conocidas desde la época de Boulton y Watt.

Un avance más importante tuvo lugar en lo que respecta a las fresadoras, construidas por primera vez para su venta en 1848. En contraste con las limadoras, acepilladoras o tornos, su gran número de filos cortantes le permitía moverse con relativa velocidad sin sobrecalentarse, y tenía la obvia ventaja de poder cortar figuras especiales en una única operación. Sin embargo, su uso fue durante largo tiempo

Fig. 169. Primitiva máquina taladradora vertical, instalada en la fundición de Soho de *Boulton and Watt*.

bastante limitado, especialmente en Inglaterra, a causa de la dificultad en hacer las fresas y mantenerlas afiladas. En 1862 la firma americana Brown and Sharpe consiguió la que a partir de entonces ha sido reconocida como la primera fresadora auténticamente universal (fig. 170). Esta máquina fue originalmente diseñada para hacer estrías en espiral para las nuevas brocas salomónicas, pero Joseph Brown, que la había diseñado, vio pronto que podía ser usada para reemplazar una gran cantidad de difíciles operaciones manuales. La máquina tuvo una inmediata y enorme aceptación en Norteamérica, pero estas fresadoras no pasaron a ser de uso general en Inglaterra hasta comienzos del nuevo siglo.

Con un aumento de la velocidad de giro en toda clase de máquinas y con la necesidad de transmitir mayor energía se originó una creciente demanda de métodos para manufacturar engranajes de metales muy resistentes, ajustados a normas muy estrictas. Estos engranajes siguieron produciéndose principalmente con fresadoras por medio de fresas moldeadas especialmente, aunque en 1877 ya se empleaban

en América máquinas automáticas para tallar engranajes. En 1856 se había inventado un método alternativo, conocido con el nombre de *hobbing*, en que se hacía girar el primordio al mismo tiempo que la fresa. Pero la primera patente para una máquina de tallar engranajes según este método no fue solicitada en América hasta 1887, y todavía habrían de pasar

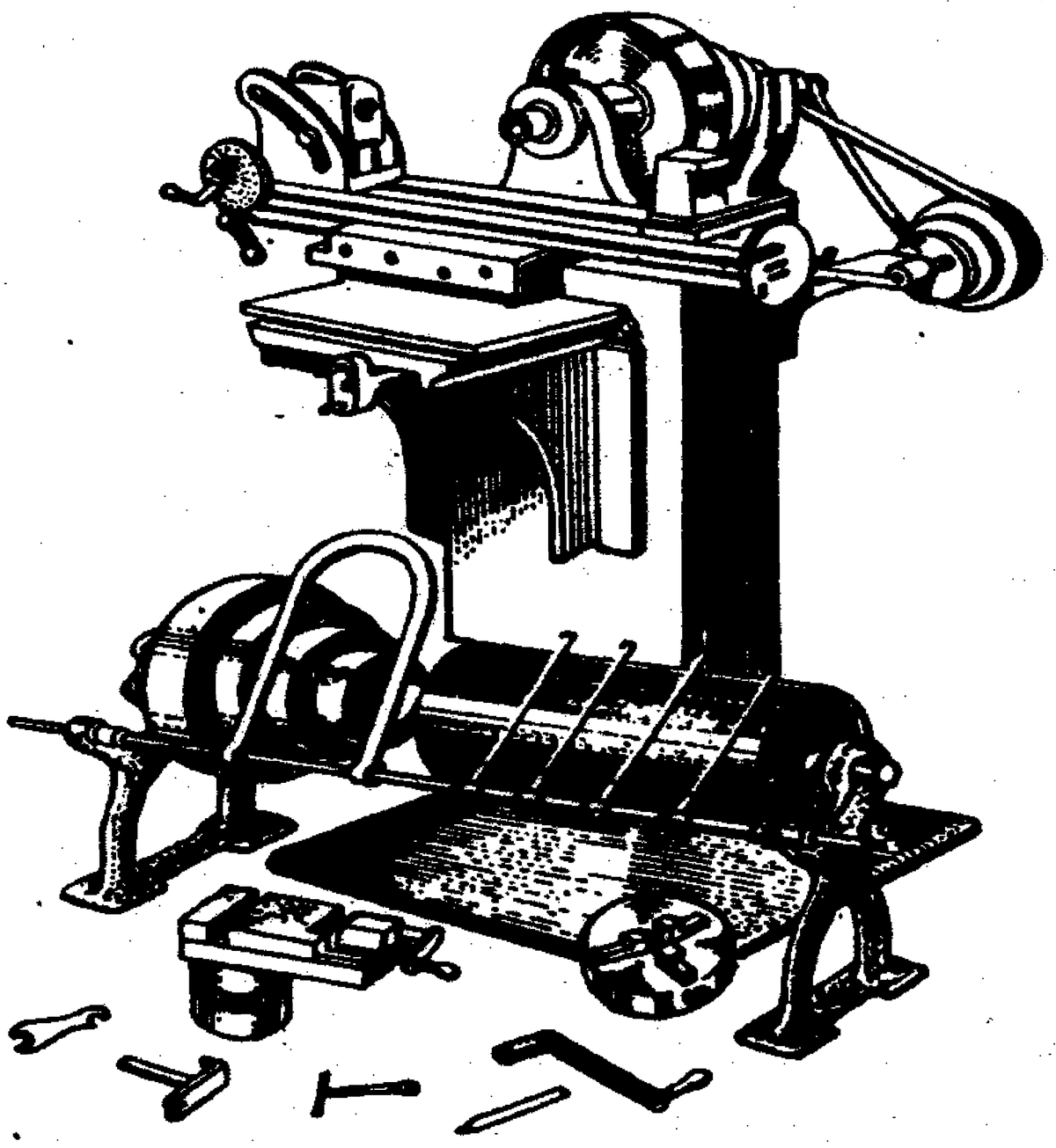


Fig. 170. Primera fresadora universal, fabricada por la Compañía Brown and Sharpe, Estados Unidos, en 1862.

diez años antes de que se generalizase el uso de la máquina; es significativo que una de las primeras máquinas inglesas de este tipo fuera la construida por el fabricante de automóviles F. W. Lanchester en 1896 para elaborar tornillos sin fin.

En el siglo XX, con el rápido desarrollo del automóvil, y posteriormente del aeroplano, la industria abrió nuevos e inmensos campos para la aplicación de las máquinas-herramienta. Aunque nunca ha sido una industria grande por lo que respecta al número de personas empleadas en ella, la industria de las máquinas-herramienta ha sido desde hace largo tiempo de la mayor importancia para cualquier clase de progreso tecnológico.

13. EL TRANSPORTE MODERNO

Los adelantos del transporte ocupan una posición clave en la historia de la revolución industrial, obrando a un mismo tiempo como causa y efecto de otros innumerables cambios. Son un efecto porque la máquina de vapor y las demás máquinas motrices surgieron e hicieron posible a un mismo tiempo las nuevas formas de transporte por mar, tierra y aire. Pero los nuevos medios de transporte fueron también una de las causas del cambio industrial. Sin ellos las materias primas voluminosas y pesadas —en la primera fase, carbón y hierro, y después acero, petróleo, estaño malayo y caucho— no podrían haberse concentrado nunca para la industria, ni podrían haberse encontrado alimentos para las poblaciones industriales. Ellos hicieron posibles los dos grandes y nuevos fenómenos sociales de la época: la urbanización general y la emigración masiva. El transporte moderno proporcionó un apremiante incentivo al desarrollo tecnológico, permitiendo a los hombres contemplar el mundo entero como una sola unidad económica, en la que cada región podía suministrar alguna cosa para las necesidades de la fabricación industrial y era en consecuencia un mercado potencial para sus productos.

El transporte debe ser tratado, por tanto, como un todo, ya que su importancia como instrumento tecnológico es distinta de la historia de la máquina de vapor, ya referida, o de las de la industria del carbón y el hierro, del motor de combustión interna y de la electricidad, que han de seguir. La construcción con destino a los transportes será igualmente tratada como un todo (cap. 15), pero en el caso del ferrocarril se incluye aquí todo menos la infraestructura porque —a diferencia de los canales y las carreteras— la construcción del ferrocarril fue sus-

tancialmente una hazaña original —quizá la única original— de la ingeniería del transporte en el siglo XIX. Consideraremos primero, sin embargo, el progreso de las comunicaciones marítimas. El barco de vela fue quizá la más hermosa realización tecnológica de la época preindustrial: no obstante, fue la red de servicios de buques de vapor la que, tanto como cualquier otro factor aislado, creó el mundo occidental y la civilización occidental tal como perduraban en 1900.

LA ULTIMA EPOCA DE LA NAVEGACION A VELA

El barco de vela de madera del siglo XVIII, su tamaño limitado por las características mecánicas de la madera de que estaba construido, su forma y aparejo determinados por larga y ardua experiencia, no se consideraban en general que admitiera un nuevo desarrollo sustancial. Esto no nos parece sorprendente cuando reflexionamos sobre las proezas de incluso los diminutos buques carboneros tales como el *Endeavour* de Cook (fig. 171) y el *Resolution*. Fue el fondo plano, diseñado para permitir la descarga del carbón en carros en las playas con marea baja, lo que hizo posible que el *Endeavour* pudiera atracar en una playa para su reparación después de haber encallado en la Gran Barrera de Arrecifes de Australia. Un barco como éste, de menos de 30 metros de largo en la cubierta inferior, era bastante marinero para resistir bien las tormentas de los *roaring forties* *, y pudo ser maniobrado por Cook suficientemente ajustado al viento para realizar sus asombrosos reconocimientos de Terranova y Australasia. Por otra parte, el buque de proa redondeada de la ruta de las Indias orientales, con su casco ancho, diseñado para llevar la máxima can-

---

* Zona tormentosa del Atlántico entre los cuarenta y cincuenta grados de latitud. (N. del T.)

tidad de cargamento, era lento pero seguro; completaba tres viajes en seis años, luego era revisado, y podía ser empleado nuevamente por la Compañía. En cuanto a desplazamiento, a finales del siglo los mayores barcos pertenecientes a la Compañía de las Indias Orientales de Londres tenían una clasificación oficial de 1.200 toneladas, mientras que un barco de la flota de primera clase —había tres clases— podía muy bien ser considerablemente más pesado. Estos necesitaban ser tan rápidos como fuertes, y podían llevar más de cien cañones, es decir, unas tres veces el armamento defensivo del buque que hacía la ruta de las Indias Orientales. Un rasgo distintivo del buque de guerra era la inclinación del costado hacia dentro, estrechamiento de las amu-

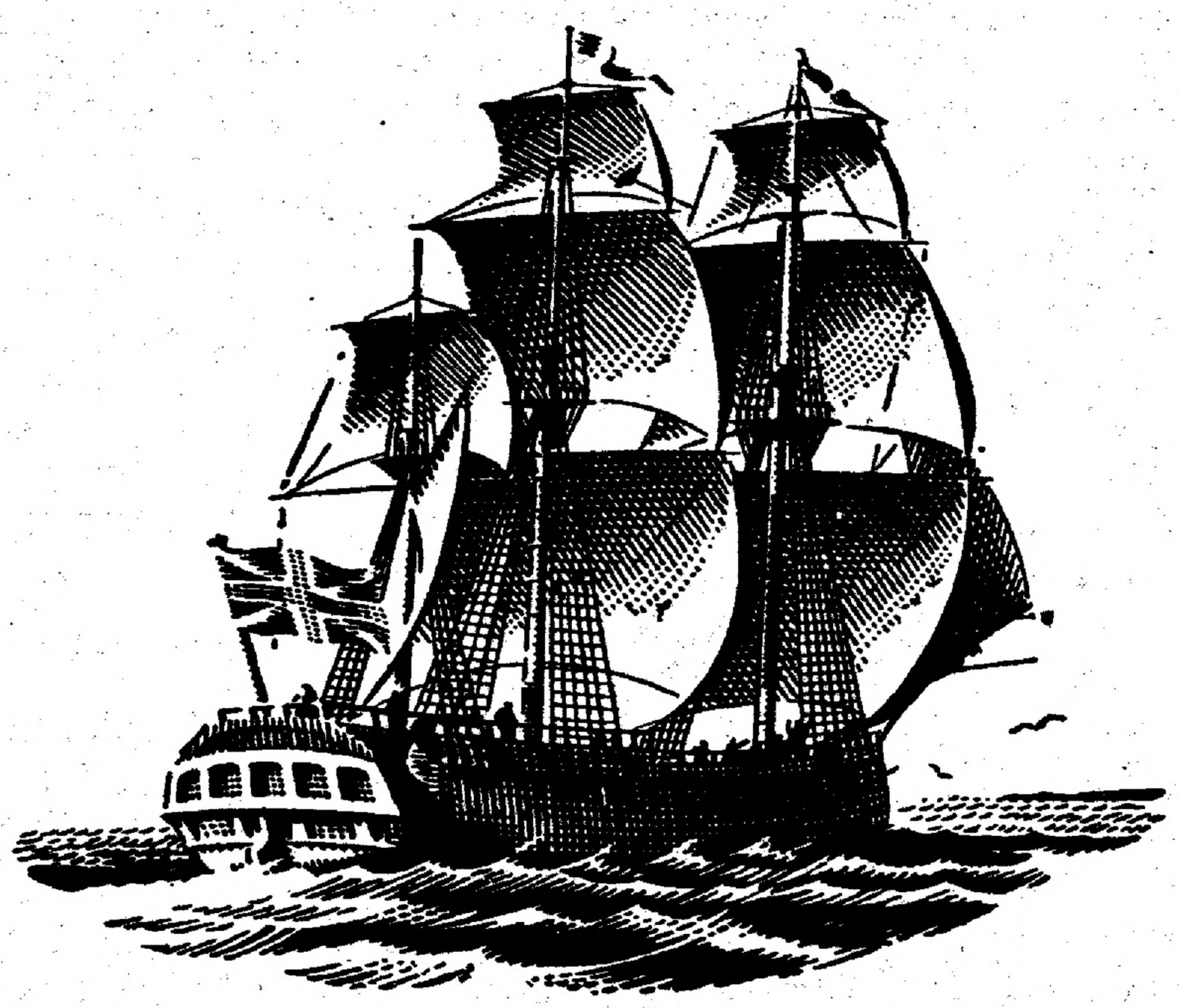


Fig. 171. El *Endeavour*, enviado por el Almirantazgo británico en 1768 para levantar la carta sur del océano Pacífico y observar el tránsito de Venus.

radas que reducía el espacio de cubierta y resultaba una desventaja cuando escoraba, pero que aumentaba la estabilidad al llevar el peso de los cañones bien dentro del casco del barco, en el punto en que se ensanchaba éste en la línea de flotación. Este rasgo lo imitó la Armada británica de los buques de guerra franceses capturados, cuyas líneas eran siempre registradas con fidelidad, pues el progreso aún no dependía de la aplicación de principios científicos sino de la copia de un diseño que hubiera tenido éxito, introduciendo en él las modificaciones adecuadas. Al mismo tiempo, Inglaterra aceptó el hecho de que los buques de guerra extranjeros de una clase dada se construyeran normalmente un poco mayores que los suyos, porque tenía gran dificultad en hallar el dinero y el material necesarios para mantener una fuerza de combate numéricamente superior a su más próximo rival. En cuanto a la aptitud del buque de guerra para los fines a que estaba destinado, bastará citar el ejemplo del *Victory*, que participó en ocho acciones importantes en un período de treinta y cuatro años, enarboló las banderas de catorce almirantes y llevó a Nelson durante los agitados años del gran bloqueo y a su muerte en Trafalgar. Aún subsiste.

El éxito engendra el conservadurismo. Hasta 1850 hubo pocos cambios fundamentales en la marina de guerra británica. Seis pequeños barcos de vapor tomaron parte en el bombardeo de Acre en 1840, pero en la guerra de Crimea el buque insignia británico en el mar Negro era un barco de madera de tres cubiertas, que fue remolcado hasta el lugar de la acción e incendiado por los proyectiles rusos. Un cambio importante en los métodos de los arsenales fue la puesta en uso por Bentham de la maquinaria de fabricar cuadernales, ya mencionada (p. 512). De más directo valor para el funcionamiento del barco en la mar fue la introducción del cobre para forrar los fondos de los barcos, que se probó durante la Guerra de Independencia norteamericana. Se

encontró que el cobre resistía el teredo que infestaba las aguas tropicales, de modo que ya no era necesario carenar los barcos en las islas antillanas y en otros lugares para eliminar la incrustación quemándola (véase fig. 87). Aproximadamente al mismo tiempo creció la demanda del empleo del hierro en la estructura, tanto para economizar madera como para aumentar la solidez: lentamente fueron puestas en uso curvas de refuerzo, curvas capuchinas y tornapuntas de hierro. Aunque Edmund Cartwright y otros habían realizado grandes mejoras en la cordelería, en 1808 (Sir) Samuel Brown, oficial e ingeniero naval, activó la puesta en uso también de cables de ancla y obenques de hierro. Los cables de cadena para el ancla tenían la evidente ventaja de que no podían romperse fácilmente —lo que contribuyó al éxito del bombardeo angloholandés del nido de piratas de Argel en 1816—, y además resultaban menos afectados por el clima, se cortaban con menos facilidad con las rocas dentadas, y eran más cómodos de arrizar que los viejos cables de cáñamo que tendían a hacer cocas. En 1840 se usaban también comúnmente los cables de cadena en la obencadura. Sin embargo, no obstante de este considerable uso del hierro, la construcción de barcos de guerra blindados se retrasó largo tiempo, a pesar de que el peligro de almacenar proyectiles en los pañoles de municiones de los barcos de madera estaba contribuyendo a impedir el abandono del anticuado proyectil sólido: una razón de este retraso era la preocupación por los riesgos de los proyectiles al rebotar en la obra de hierro.

Con la excepción de un breve período de intensa construcción de fragatas durante la guerra americana de 1812, en el medio siglo que siguió a Trafalgar el campo de la competencia internacional lo constituyó no tanto el barco de guerra como la marina mercante, desempeñando el buque de vapor, por las razones ya referidas (p. 474), un papel más bien poco importante. En el año del ascenso al trono de la

reina Victoria, sus súbditos de Gran Bretaña disponían de sólo 668 buques de vapor, con un promedio de no más de 120 toneladas cada uno. Con todo, la liberación del comercio del Oriente Lejano del monopolio de la Compañía de las Indias Orientales en 1833 fue seguida de una intensa competencia en la expedición de opio a China y el transporte de té desde ésta a Occidente. En 1849 la derogación del Acta de Navegación abrió el comercio británico a todos los que acudieran, y en el mismo año la fiebre del oro que se produjo desde el cabo de Hornos hasta California dio nueva importancia a la velocidad, como lo hizo también la fiebre del oro australiano que la siguió rápidamente. De aquí la gran época del clíper, con su larga proa afilada, su línea baja y sus palos inclinados. Donde los anticuados mercantes que hacían la ruta del Oriente Lejano eran por lo general aparejados para afrontar los temporales reduciendo velamen por la noche, los clípers navegaban a toda vela en sus muy anunciadas carreras con las primicias de la nueva cosecha de té, carreras en las que podían llegar a Londres desde Shangai en noventa días o incluso en menos.

El diseño del clíper parece que provenía de la goleta yanqui del siglo XVIII, un barco de dos palos que se deslizaba sobre el agua, desarrollado en Baltimore para corsear contra Inglaterra en la guerra de 1812. Algo bastante parecido estaban produciendo los constructores de barcos de Aberdeen en los años 1840 con el incentivo de los pasajeros y cargamento de la costa este que acudían a Londres, pero su principal interés reside en el papel que desempeñó después de 1849 en el auge repentino de la marina mercante americana, cuyos barcos hechos de madera de coníferas, más baratos aunque menos duraderos, amenazaban con arrebatar el negocio del transporte a los barcos de madera dura procedentes de los astilleros británicos.

Algunos de los clípers de emigrantes excedían de las 2.000 toneladas, con un velamen de alto trazado

y la posibilidad de ser manejados con cualquier clase de tiempo; eran los únicos barcos de vela que recorrían 400 millas marinas en un día. Los clípers que transportaban té eran por lo general de menos de la mitad del tamaño de los anteriores, pero tenían que ser construidos con mayor habilidad a fin de sacar el máximo partido de las ventolinas de los mares de China. El desafío americano terminó con el estallido de la guerra civil de 1861, mientras que en 1869 la apertura del canal de Suez, sólo transitable para buques de vapor, marcó el principio del fin para todos los barcos de vela en el comercio rápido con Oriente. Por ello, puede decirse que el milenario diseño del barco de vela alcanzó su culminación con barcos como el *Ariel*, construido en Greenock, Escocia (de 60 metros de eslora y 10,3 metros de manga, aproximadamente), que como un nuevo barco (fig. 172) compitió con el *Taeping* a lo largo del canal de la Mancha en 1866 a una velocidad de 14 nudos: ambos barcos atracaron en el Támesis en la misma marea a los noventa y nueve

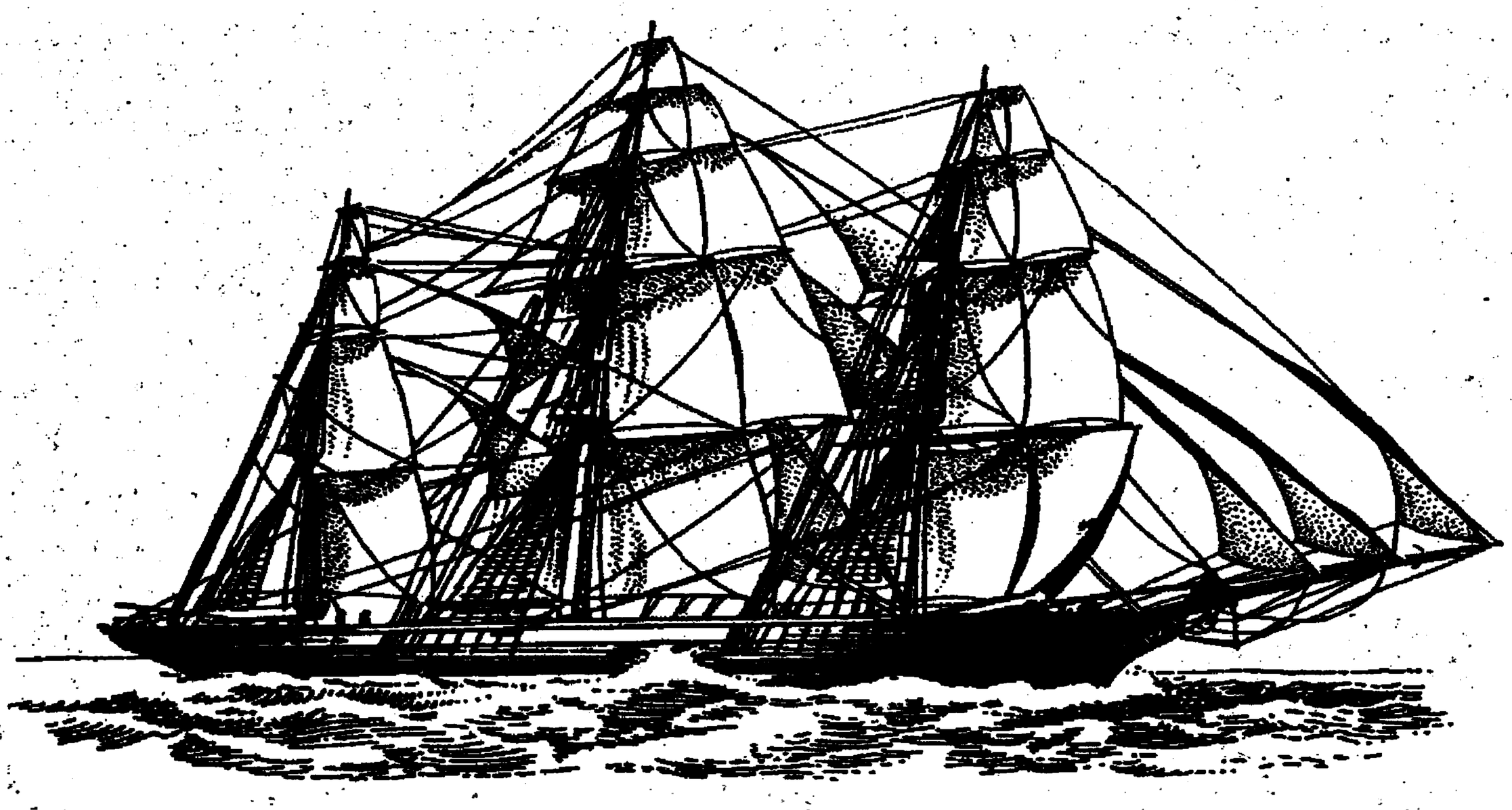


Fig. 172. El *Ariel*, uno de los últimos clípers dedicados al transporte de té.

días de su salida del fondeadero de Pagoda. Pero por entonces la construcción en madera se estaba extinguiendo al igual que la propulsión a vela; el hecho de que se considerara perjudicial para el té su transporte en un casco de hierro fue lo único que retrasó la adopción de dicho tipo de casco en el comercio del té. El *Taeping* y el *Ariel* son ejemplos de un compromiso temporal conocido como construcción mixta: estaban construidos en tablazón de teca sobre cuadernas de hierro. Llevaban también de hierro el palo macho, y los obenques eran de alambre, con objeto de que soportaran la tremenda presión que recibían sobre sus velas.

La proeza de los barcos de vela es aún más impresionante si se compara con la persistente ignorancia del hombre con respecto a los mares por los que navegaba. En 1702 Halley había publicado una carta mundial de la declinación magnética, que resultó extremadamente valiosa para los navegantes, pero quedaba aún mucho por aprender acerca de los caprichos de la brújula. La «desviación» de la brújula resultante de la propia obra de hierro del barco no fue investigada científicamente antes de los primeros años del siglo XIX, cuando el capitán Matthew Flinders, enviado por el recién formado Departamento Hidrográfico del Almirantazgo británico para hacer un estudio más amplio de la costa de Australia, utilizó su ocio forzado como prisionero de guerra napoleónico en la isla Mauricio para escribir una memoria sobre este tema con destino a la Royal Society; de aquí el invento de la «barra de Flinders» para corregir el efecto del hierro imanado del barco. La estima del rumbo de un barco continuó basándose en el movimiento horario de la corredera. Los sondeos se hacían también en forma primitiva mediante una plomada provista de un escandallo con un peso de unos 6 kilogramos y de una sondaleza de cáñamo con la longitud marcada en brazas. Hasta los tiempos de los buques de vapor, fue imposible sondear más de 10 brazas sin detener el barco de

reconocimiento; y el hueco en el fondo del escandallo (hueco que se llenaba de sebo para hacerlo adherente) subía una muestra del fondo del mar de no más de unos 25 centímetros cuadrados. Aunque el capitán C. J. Phipps, volviendo de las islas Spitzberg en 1773 (con el guardiamarina Horacio Nelson a bordo), hizo el primer sondeo de grandes profundidades registrado en la historia, y Benjamín Franklin estaba usando por esas fechas el termómetro para fijar los límites de la corriente del Golfo por medio de la observación de la temperatura, la oceanografía sistemática data sólo de mediados del siglo XIX.

El número de posiciones fijadas con exactitud en términos de latitud y longitud aumentó de 109 en 1706 a más de 6.000 en 1817; en 1849 el Almirantazgo británico había publicado 1.748 cartas de navegación. M. F. Maury, que había sido nombrado director del Instituto Cartográfico de los Estados Unidos en 1841, realizó una carta del Atlántico norte y promovió una conferencia en Bruselas para asegurar la cooperación internacional. Su *Physical Geography of the Sea* (1853) se convirtió en el libro de texto más habitual, y se decía que el uso de sus cartas de vientos y corrientes había reducido en un cuarto la duración media del viaje de Nueva York a California por el cabo de Hornos, y en un quinto el de Inglaterra a Australia vía El Cabo. Las diferencias son del orden de cuarenta y ocho y veintisiete días, respectivamente, notable ilustración de los riesgos rutinarios a que habían estado sometidos los barcos de vela.

LA EPOCA DE LOS BUQUES DE VAPOR CONSTRUIDOS CON HIERRO Y ACERO

El cambio de la madera al hierro y más tarde al acero, y el cambio aproximadamente simultáneo de la vela al vapor, terminó con gran parte de la aventura de los viajes por mar; desde el punto de vista del historiador de la tecnología, sin embargo, la

principal importancia del cambio estriba en la primacía que otorgó a la industria británica de la construcción naval. Se calcula que en la década de 1840 el 90 por 100 de los barcos mercantes del mundo se construían con madera. En esas fechas, los Estados Unidos, con su enorme tráfico lacustre y fluvial, poseían un tonelaje mayor que Inglaterra, y la mitad de la construcción naval del mundo se realizaba en el litoral americano y canadiense, donde los precios de la madera hacían imposible la competencia británica. Podemos contraponer a esta situación la de los años 1892-94, cuando la parte de Inglaterra en un total muchísimo mayor de construcción de flota mercante alcanzaba el 81,6 por 100. Pero el nuevo material contribuyó más a la producción de este resultado que la nueva fuente energética, pues las estadísticas de los astilleros de Clyde, en Escocia, prueban claramente que la construcción de barcos de vela de hierro, económica para los largos transportes de lana o grano (que en los barcos de madera menos impermeables tenían que ir siempre ensacados), estaba alcanzando en aquel mismo tiempo su cumbre final.

Aun teniendo en cuenta las consideraciones estéticas y las tradiciones conservadoras de una industria sólidamente establecida que englobaba a gran parte de los más expertos carpinteros, el cambio al hierro en la construcción naval británica parece sorprendentemente lento. En 1787 John Wilkinson botó en el río Severn una barcaza de unos 21 metros hecha de planchas atornilladas de hierro colado, y en 1802 había ya otras en los canales en torno a Birmingham. En Escocia la primera barcaza de hierro fue diseñada en 1816 por un emprendedor oficial que regresaba del servicio del nizam de Haiderabad; construida por un carpintero y dos herreros, fue utilizada con éxito durante medio siglo para transportar carbón por el Firth de Clyde. En 1822 el primer buque de vapor de hierro construido para cruzar el Canal fue montado en el Támesis con pie-

zas prefabricadas en una herrería de Staffordshire. En dos tempranas ocasiones (1833 y 1844) los barcos de hierro demostraron su solidez con su supervivencia después de haber embarrancado en arriesgadas condiciones. La gran firma de construcción naval conocida más tarde como Cammell Laird empezó a utilizar el hierro en Birkenhead en 1829, y el ingeniero William Fairbairn lo hizo en el Támesis en 1836. Sin embargo, Clydeside no empezó a producir los artículos necesarios para los barcos de hierro hasta 1839, y cuando la recién constituida línea Cunard propuso llevar el correo transatlántico en vapores movidos por ruedas de paletas en 1840, los primeros cuatro barcos en servicio tenían todos aún cascos de madera.

Frente a la falacia fácilmente refutada de que un barco de hierro no flotaría, había que oponer las sólidas ventajas de fortaleza y de economía de producción; además, en potencia, los barcos de hierro podían hacerse mucho más largos que los de madera. La máxima eslora de un barco de madera se consideraba que era de unos 90 metros, límite impuesto por la resistencia restringida de la madera. La importancia de la aptitud del barco para resistir la comba de su largo eje, especialmente en relación con la distancia que separa las olas, se había hecho más clara gracias a los estudios teóricos que publicó Pierre Bouguer en París en 1746. Probó que el efecto combinado del peso del barco y de su flotabilidad en el agua creaba tensiones en el casco al moverse a través de las olas, siendo presionada la parte central del barco alternativamente hacia arriba (quebrantada) o hacia abajo (arrufada) en relación con sus dos extremidades. El análisis de Bouguer fue mejorado por el sabio Thomas Laing en 1811, pero transcurrió medio siglo más antes de que este problema, fundamentalmente importante, fuera analizado rigurosamente por Fairbairn y por el profesor de Glasgow W. J. M. Rankine. Pudo entonces dise-

ñarse un casco de hierro para resistir la tensión calculada.

Fue posible construir un barco de hierro bastante fuerte para prescindir de la quilla, y construirlo de cualquier eslora deseada con planchas de hierro. Con el perfeccionamiento del laminador, se hizo posible ensamblar las cuadernas con simples barras de hierro que iban desde el plano diametral a la regala. Sin embargo, algunos de los primeros constructores de barcos de hierro, practicando un conservadurismo no infrecuente en la historia de la tecnología, construían asiduamente sus montajes con piezas pequeñas de hierro, igual que los constructores de barcos de madera habían utilizado por necesidad pequeñas piezas de madera. El conocido arquitecto naval victoriano John Scott Russell fue uno de los que prefirieron prescindir de las cuadernas y confiar la resistencia a divisiones transversales o mamparos unidos por refuerzos longitudinales, que proveerían también de una serie de compartimientos estancos. Las cuadernas servían durante la construcción como andamiaje adecuado para sostener las planchas de hierro martilladas y (más tarde) laminadas, que se venían fabricando ya para las calderas, y que proporcionaban al barco de hierro su forro casi indestructible. Las planchas iban de popa o proa en serie como en un barco de madera, y al principio se colocaban en tingladillo; pero después de 1850 aproximadamente se unían a tope con remaches a través de las cuadernas. Las junturas entre las planchas se hacían impermeables martillándolas. Se ponían forros interiores, y más tarde otros dispositivos, de forma que las planchas exteriores pudieran ser remachadas a las cuadernas sin ningún riesgo de alabeo entre las partes.

Pronto se advirtió que en cualquier tipo de barco se podían conseguir grandes economías normalizando el espesor de las planchas, el tamaño de los remaches y el tipo de los hierros angulares usados en la construcción de las cuadernas. Pero hasta cerca

de finales del siglo —cuando empezaron a aparecer en los astilleros las remachadoras hidráulicas— los remaches, que podían llegar a ser millones en un barco grande, se hincaban totalmente a mano. Cada remache era calentado en un horno portátil por un muchacho, que lo pasaba (o tiraba) al sufridor; éste lo martillaba a través de su agujero, y lo retenía en su sitio para que dos remachadores le aplastaran la punta con golpes alternativos.

En diciembre de 1853 Isambard Kingdom Brunel firmó el contrato para «el gran barco de hierro». Este famoso ingeniero de ferrocarriles y puentes había proyectado ya dos buques de vapor de gran éxito para el servicio transatlántico: el *Great Western,* primer buque de vapor diseñado para esa travesía, y el *Great Britain,* un buque de vapor de hierro que sirvió durante treinta años después de pasar su primer invierno encallado cerca de la costa occidental de Irlanda. El *Great Eastern,* sin embargo, fue pensado para probar toda la potencia de un vapor de hierro que llevara combustible suficiente para un viaje a Australia y regreso, a la ida por El Cabo y a la vuelta vía cabo de Hornos. Este barco constituyó un audaz intento de vencer el gran obstáculo existente para el desarrollo del barco de vapor: el hecho de que el carbón ocupara tanto espacio que no quedaba sitio para otros géneros menos lucrativos que los pasajeros y el correo; pues apenas existían todavía puertos donde cargar carbón a lo largo de las extensas rutas oceánicas. Como anuncio de las posibilidades estructurales del hierro, el *Great Eastern* constituyó un gran éxito; como demostración del uso económico del carbón fue un triste fracaso.

El *Great Eastern* tenía un doble forro de planchas en la línea de flotación con las cuadernas entremedias, sosteniendo la maquinaria y los enormes pañoles de carbón; encima tenía mamparos colocados a lo largo, diseñados como los tubos empleados en el puente Britannia (p. 661). Un rasgo distintivo del pro-

yecto era la normalización de los tamaños de las planchas, los hierros angulares, los remaches, etc. El alojamiento para 4.000 pasajeros estaba dispuesto sobre un total de cinco cubiertas; incluso su maroma de fibra de coco, de más de un metro de circunferencia, era de tamaño récord. El hecho de que su arqueo total de 18.918 toneladas no fuera igualado hasta terminar el siglo XIX puede indicar con claridad que la concepción básica era poco sólida, como probaron los acontecimientos, pero el casco, con un peso aproximado de 6.250 toneladas, compuesto de 30.000 planchas unidas por unos 3 millones de remaches, se reveló en excelentes condiciones cuando fue desguazado el barco en 1888, treinta años después de que las dificultades de su botadura, que implicaron un gasto imprevisto de 120.000 libras, hubieran conducido a la compañía original a una virtual bancarrota. El *Great Eastern* no se empleó nunca en los largos recorridos para el transporte de pasajeros para los que había sido proyectado, y *faute de mieux* hizo su mejor servicio como buque cablero. Su defecto fatal residió en una subestimación de la cantidad de carbón que necesitaban sus motores combinados de ruedas de paletas y hélices —que desarrollaban 6.600 cv— para conducir este enorme barco a la velocidad proyectada de 14 nudos (fig. 173). El tiempo de navegación requerido para el viaje de ida y vuelta a Australia era de unos setenta y cinco días; los pañoles de carbón contenían 12.000 toneladas, pero la diferencia entre el consumo de carbón previsto y el que necesitaba en la práctica fue del orden de un 75 por 100.

Se comprende ahora fácilmente por qué el triunfo final del vapor, aunque acelerado por la apertura del canal de Suez, fue un proceso mucho más lento y complicado que, por ejemplo, la sustitución de la diligencia por el ferrocarril. Para el transporte de cargamentos de géneros imperecederos, en particular, la vela sólo fue sustituida lentamente en la segunda mitad del siglo XIX, cuando los motores em-

pezaron a consumir menos combustible: el primer gran éxito fue el de Alfred Holt, un ingeniero transformado en naviero, que en 1865 equipó un barco con máquinas de expansión múltiple (p. 472) que le permitirían llevar 3.000 toneladas de carga en un viaje de 8.500 millas sin escalas, desde Liverpool a la isla Mauricio. Por otra parte, la generalización de puertos de aprovisionamiento de carbón por el mundo fue tanto resultado como causa del desarrollo del tráfico de vapores, ya que el establecimiento de provisiones de repuesto en puntos convenientes fue obra principalmente de los vapores sin itinerario fijo.

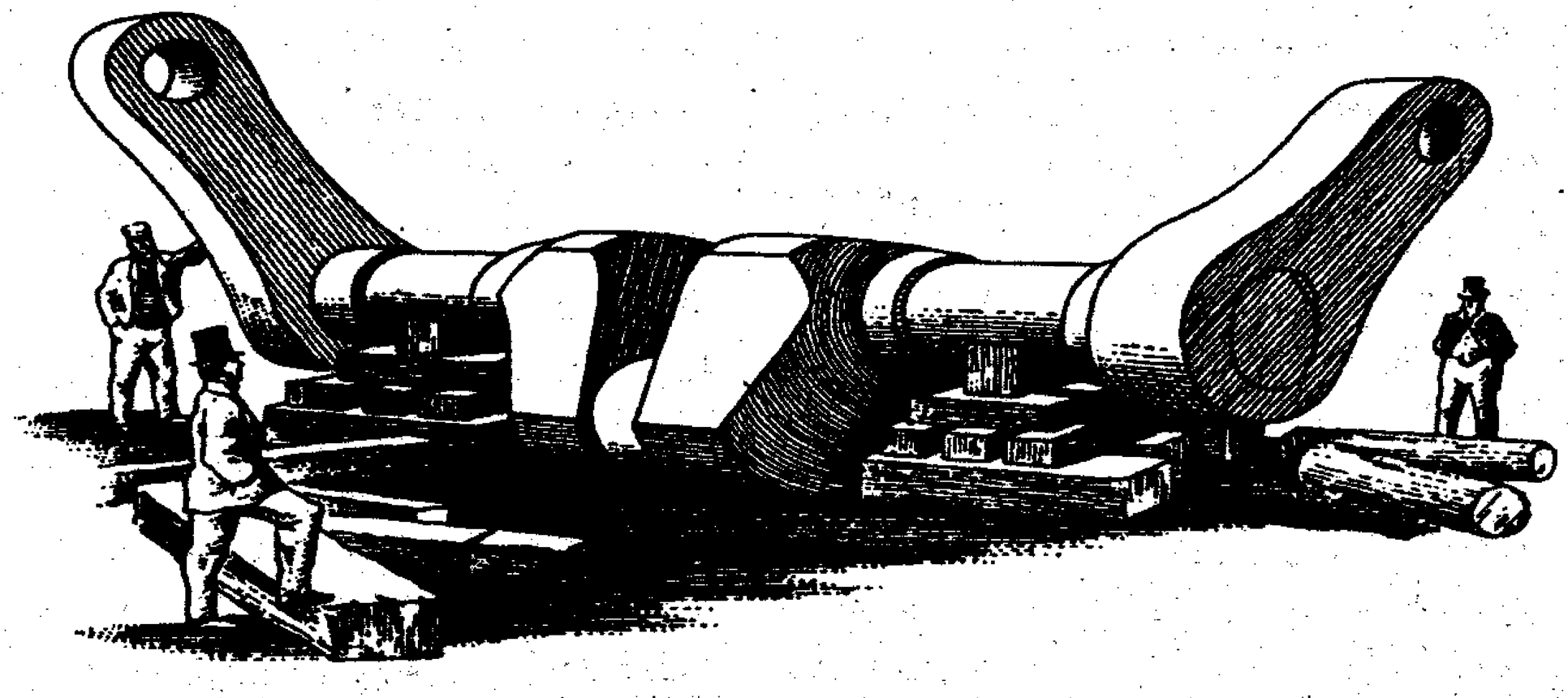


Fig. 173. Eje intermedio del motor de ruedas de paletas del *Great Eastern*.

† Los buques de guerra contemporáneos del *Great Eastern* proporcionan una ilustración interesante de los cambios que se sucedían. El blindaje, de unos 12 centímetros de grosor, fue empleado por vez primera por los franceses para revestir una fragata de madera construida en 1859. A esto replicaron los ingleses dos años más tarde con el *Warrior*, todo de hierro colado, cuya eslora de unos 116 metros fue posible sólo gracias al uso de cuadernas de hierro. Pero aunque tenía un potente motor de hélice, estaba también plenamente enjarciado para vela, y tenía un mecanismo elevador, movido por 600 hom-

bres, para subir la hélice a un pozo mientras el barco estaba al pairo. Los barcos de guerra llevaban tripulaciones numerosas, y no les compensaba una economía de brazos abandonando el uso de la vela; además, les convenía permanecer en el mar durante largos períodos a coste mínimo, y a menudo en regiones distantes de los puertos de aprovisionamiento de carbón. Cuando la torreta (p. 732) sustituyó a la batería, los palos y todo el aparejo se convirtieron en un serio obstáculo; a pesar de ello, y a pesar también de la rivalidad naval más intensa que empezó en 1888, la Armada británica aún mantenía en 1900 algunos barcos de vela en puestos remotos.

A finales del siglo XIX la sustitución del hierro por el acero como material de construcción naval constituyó el cambio más notable. Algunos de los primeros ejemplos de su uso se dieron en la construcción de los veloces buques forzadores del bloqueo por los confederados durante la Guerra Civil americana para eludir al *Monitor* y sus acompañantes: el tipo de construcción más ligera que este material hacía posible significaba un aumento en la velocidad. Pero la botadura de un barco rápido de acero para la Armada británica en 1877 marca el momento en que comienza un cambio veloz, de tal forma que a finales del siglo el hierro había sido casi completamente reemplazado. Los métodos de construcción en acero eran semejantes a los de la construcción en hierro, pero se ahorraba regularmente una quinta parte en el grosor del material. Los buques de acero *Campania* y *Lucania* de la línea Cunard, construidos en 1893, con máquinas de vapor que desarrollaban 30.000 cv, representan la culminación de la construcción naval del siglo XIX. Tenían más de cuatro veces la potencia del malhadado *Great Eastern*, aunque estaban diseñados para llevar menos de la mitad de pasajeros a menos de la mitad de distancia. Mientras que la mayoría de las chapas del forro del *Great Eastern* eran cada una de 3 × 0,8 metros y pesaban unos 375 kilogramos, las de los dos buques de

la Cunard eran por lo general de 7,5 × 1,8 metros y pesaban 2 toneladas; algunas eran aún mayores. Significativamente, no tenían ningún tipo de aparejo para velas.

El otro cambio principal en la construcción naval lo constituyó la creciente especialización. Los primeros vapores se habían construidō para llevar pasajeros y carga conjuntamente, aunque en la ruta del Atlántico norte la preocupación por la velocidad redujo el transporte de carga al mínimo. Pero Inglaterra, como primera potencia en la construcción naval, se hallaba en la venturosa posición de poder vender los tipos de buques que iban quedándose anticuados a países menos afortunados, como Noruega, que encontraban suficientemente ventajosa la utilización de buques de transporte no regulares y de su tripulación; además, las disposiciones acerca de la marina mercante de 1894 pusieron en vigor regulaciones más estrictas para todos los barcos británicos proyectados para llevar pasajeros. De aquí la aparición del carguero de línea, con sus cubiertas de acero, numerosos tornos y grúas y vigas inmensamente fuertes, hechas de tubos de acero, que iban de popa a proa. Estas vigas longitudinales hicieron posible construir bodegas sin las filas de pilares contiguos que en los primeros barcos habían sostenido la cubiertas con serio detrimento de la capacidad de estiba. Pero en forma creciente estaban apareciendo tipos importantes de cargamentos para los que el tamaño de la bodega no era lo único a tener en cuenta. La provisión de cámaras frigoríficas (p. 1.030) para carne y otros comestibles rápidamente perecederos es un ejemplo claro. Otro ejemplo lo constituye el desarrollo de los petroleros, que en el siglo XX habían de resultar un factor vital tanto en la paz como en la guerra.

Cuando el petróleo se transportaba en barriles o latas, como era corriente al principio, aunque para líquidos como el vino habían estado en uso mucho tiempo vehículos cisterna (fig. 174), su estiba reque-

ría casi dos veces el volumen del propio petróleo; si se transportaba a granel existía la peligrosa posibilidad de que un oleaje ingobernable hiciera zozobrar al barco. De aquí el desarrollo a partir de la década de 1870 de un tipo especial de barco adecuado. Tenía la maquinaria colocada a popa para reducir el peligro de incendio; una estudiada división por mamparos para contener el petróleo en tanques separados, y cámaras de expansión que proporcionaban espacio encima de los tanques para impedir el derrame o la contracción del petróleo dejando sitio en la parte

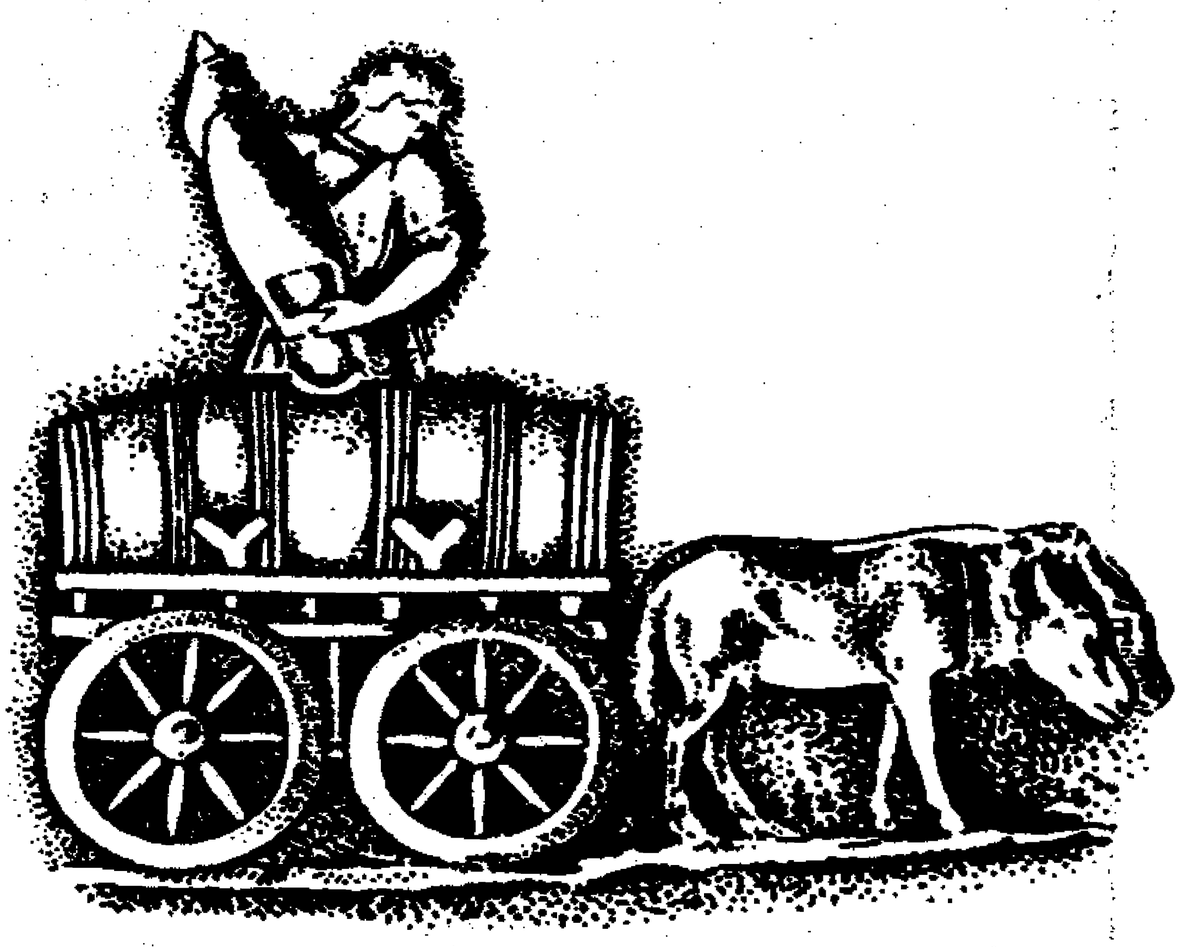


Fig. 174. Carro cisterna romano de época tardía para el transporte del vino.

alta del tanque para el movimiento. Además, un buque cisterna requería una superior calidad de remache. En un buque ordinario las pequeñas filtraciones de agua se tapaban generalmente pronto con la corrosión, pero como el petróleo impide la corrosión del metal, las filtraciones de los petroleros no eran autoobturantes. Pero el desarrollo del transporte del petróleo en petroleros fue más bien lento hasta finales del siglo XIX porque, hasta que las necesidades del automóvil reforzaron la insistente demanda del artículo, las autoridades se mostraban reacias —a causa del peligro de incendio— a permitir en los puertos de llegada la instalación de los grandes depósitos de almacenamiento necesarios.

El enorme aumento del tráfico marítimo de todas clases fue acompañado por un importante desarrollo de los aparatos para guiarlo y protegerlo. Aunque la cooperación internacional en este campo se había establecido en 1853 (p. 537) y el uso de barcos de vapor facilitó finalmente el trabajo del topógrafo, la ciencia de la oceanografía debió su primer gran impulso al viaje alrededor del mundo del *Challenger* en 1872-76 y al informe en 50 volúmenes que le siguió. Durante la segunda mitad del siglo el número de cartas hidrográficas del Almirantazgo británico se duplicó aproximadamente, llegando a 3.413 en 1900. Un gran aumento de la exactitud y de la velocidad de la observación se derivó de la introducción en 1878 de máquinas de sondeo, perfeccionadas por Sir William Thompson (más tarde Lord Kelvin) a partir de inventos anteriores. Usó alambre delgado de piano en vez de sondalera de cáñamo; una «antena» colocada en el alambre indicaba cuándo había tocado fondo; y unas tablas relacionaban la longitud del alambre largado con la velocidad del barco. Este aparato era apropiado para profundidades de hasta unas veinte brazas. Thompson fue también autor, aproximadamente en el mismo período, del compás magnético de rosa seca, que es aún el equipo normal de los buques mercantes. Los silómetros o correderas perfeccionadas fueron otra innovación que permitió leer la distancia recorrida en esferas sin halar la corredera a bordo: la de Massey fue de uso general en 1840, la de Walker en las dos últimas décadas del siglo. Mientras tanto, la extensión del telégrafo eléctrico puso a disposición de los marineros en los principales puertos del mundo el tiempo exacto para la determinación de la longitud. Pero quizá el mayor avance de todos lo constituyó la mayor disponibilidad de una de las más antiguas ayudas a la navegación. En 1850 el número de faros y buques faros en todo el mundo conocidos por el Almirantazgo británico era de 1.570; en 1900 sumaban 9.424. Este último

total se ha triplicado sobradamente en los tiempos actuales.

Se estima que las marinas mercantes del mundo totalizaban en 1800 unos cuatro millones de toneladas netas, que es dos veces la cifra calculada por Sir William Petty para 1666. El desarrollo del comercio durante el siglo XIX puede valorarse por el hecho de que el tonelaje total se había duplicado en 1840 y vuelto a duplicar en 1860; en 1886 el primer año de los circuitos precisos de ida y vuelta era de 17.910.000 toneladas, y 20.531.000 toneladas en 1900. La cifra final es impresionante porque dos tercios de ella correspondían al arqueo de los vapores, que realizaban por término medio un trabajo anual cuatro veces superior al de los barcos de vela de la misma carga, generalmente más lentos y mucho menos puntuales y seguros en sus movimientos. Por lo que se refiere a la participación de la marina mercante británica en este enorme desarrollo, durante dos décadas después de Waterloo el tonelaje permaneció estacionario en unas 2.500.000 toneladas. A mediados de siglo se estimaba que Inglaterra poseía alrededor del 60 por ciento del total de barcos de altura propiedad de las grandes potencias, aunque por entonces y hasta su Guerra Civil los Estados Unidos le estaban dando alcance rápidamente. En 1900, sin embargo, la flota de Gran Bretaña, con 9.304.108 toneladas, era más de dos veces superior a las dos mayores flotas siguientes, la americana y la alemana, juntas. Lo que entonces parecía una preponderancia a largo plazo se aseguraba además por el hecho de que más de las tres cuartas partes de los barcos ingleses eran de vapor.

EL DESARROLLO DE LOS FERROCARRILES

El desarrollo de las comunicaciones interiores para satisfacer las necesidades de la revolución industrial fue sobre todo obra de los ingenieros civiles, pues ni el barco estrecho (20 × 2 metros aproximadamente)

ni el coche-correo implicaron ninguna notable novedad técnica en los métodos de construcción. Tampoco hubo ninguna nueva rama importante de la tecnología que procediera inmediatamente del funcionamiento efectivo del sistema de canales o de las carreteras de peaje macadamizadas. En cambio, con el tren y la vía férrea no ocurrió lo mismo.

Fig. 175. Vagoneta de carbón tirada por un caballo, Newcastle upon Tyne, 1773.

El ferrocarril o carril para vagones, como hemos visto (p. 307), es mucho más antiguo que la locomotora. A fines del siglo XVIII se usaba ocasionalmente para muchos fines —por ejemplo, se habían tendido carriles a través de Chat Moss para secundar un proyecto de drenaje una generación antes de que el ferrocarril Liverpool-Manchester llegara allí—, pero siempre estuvo presente sobre todo en el transporte del carbón (fig. 175). La introducción de canales en Inglaterra acrecentó la utilidad del ferrocarril como medio de enlace barato con la activa bocamina; en 1800 se exportó a la cuenca del Ruhr como «el camino inglés para el carbón». Mucho antes de que las vías férreas del lenguaje moderno —que consideraremos como parte de la construcción en general (página 650)— fueran tendidas a través del país, estaba empezando a desarrollarse el propio carril, al que por eso tomaremos como punto de partida.

El hierro había sustituido a la madera como material para la fabricación de carriles en Whitehaven ya en 1738, pero su uso más extendido puede datarse a partir de la fundición de carriles en Coalbrookdale en 1767. En cuanto a la forma, lo más corriente era un carril ancho con un reborde vertical en el lado interior para mantener en posición las ruedas planas de las vagonetas, que tenía la ventaja de que no privaba a éstas de correr también a lo largo de los caminos públicos. Pero los contracarriles usados en conjunción con ruedas de reborde (fig. 176) fue-

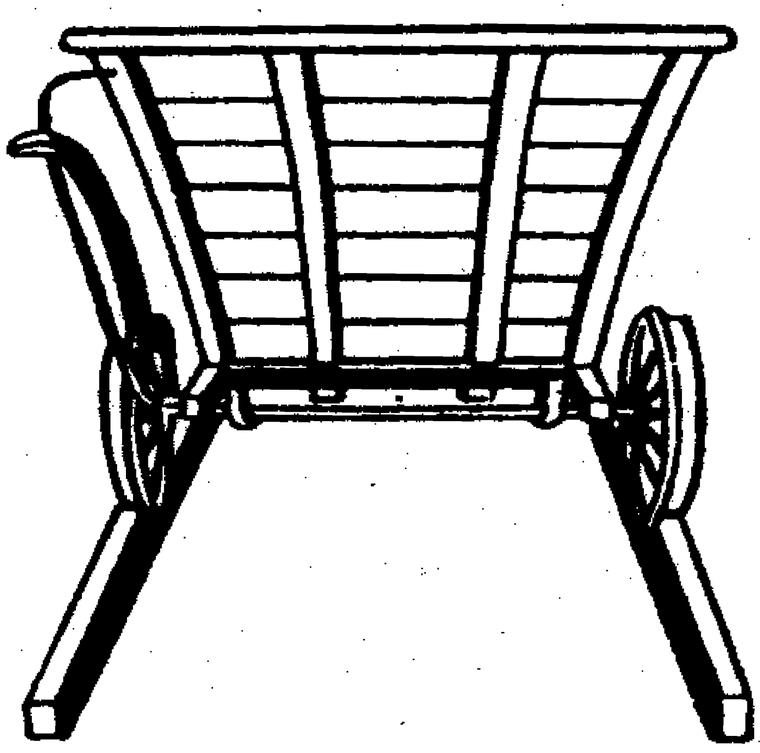


Fig. 176. Vagoneta de carbón con ruedas de reborde.

ron también un invento que data de un período muy anterior, al menos en el norte de Inglaterra, y se estaban generalizando en el tiempo de su empleo en los experimentos de Trevithick con locomotoras, ya mencionados (p. 483), en el sur de Gales y Londres (fig. 177). El progreso ulterior se retrasó por la fragilidad del material de hierro colado, pero en 1820 los experimentos con hierro forjado, más caro, culminaron en una patente para laminar barras de hierro forjado en forma de contracarriles, cuya durabilidad motivó su adopción para el ferrocarril Liverpool-Manchester en 1830; su uso se hizo entonces práctica corriente. A mediados de siglo los ferrocarriles británicos empleaban generalmente carriles de hierro de doble T, no muy diferentes del moderno carril «americano», enchavetado en cojinetes sobre

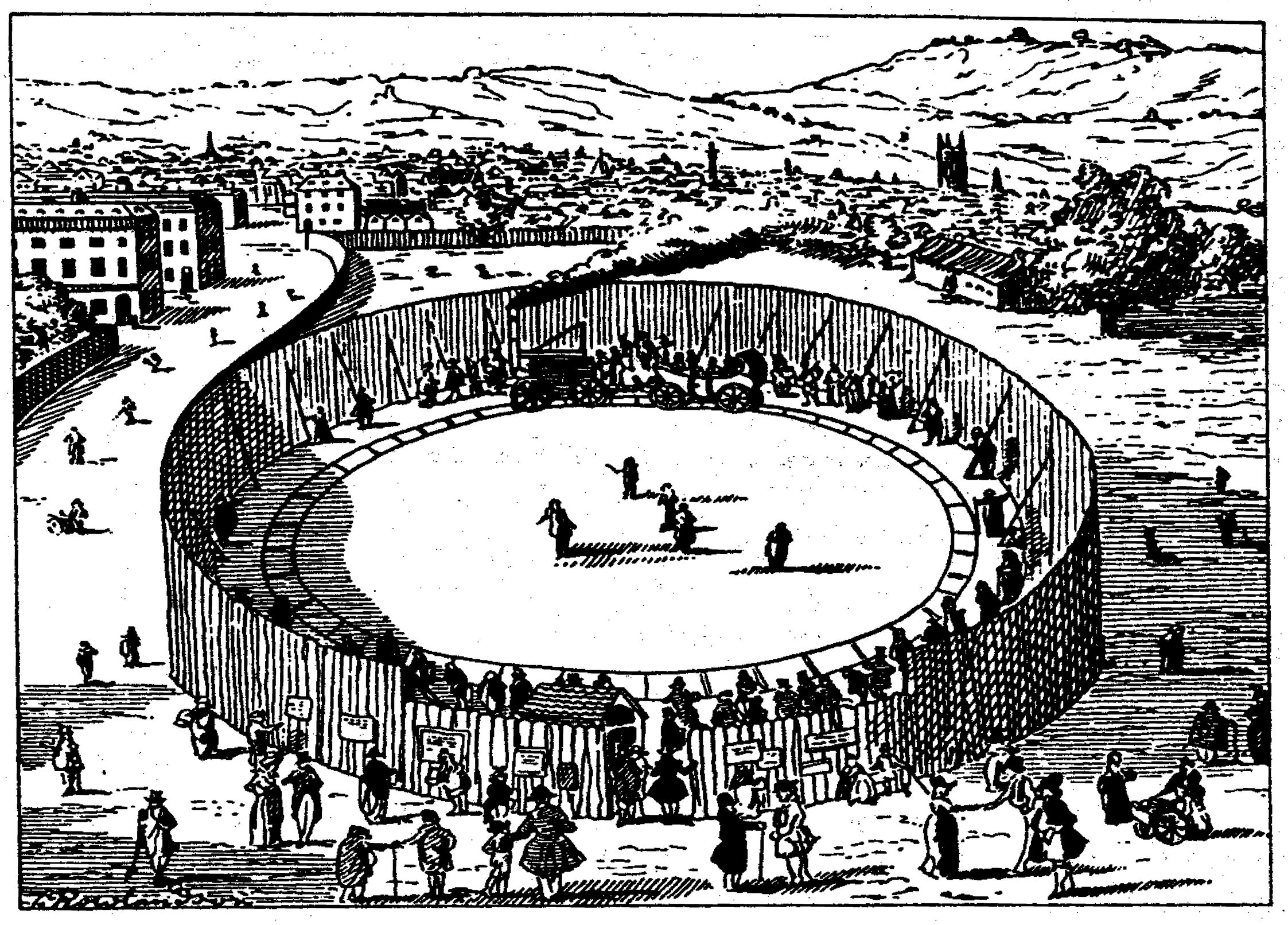


Fig. 177. El «Cójame quien pueda», de Trevithick, primer ferrocarril de viajeros del mundo, 1808.

traviesas de madera. Una alternativa era el carril en T invertida diseñado por el americano R. L. Stevens en 1830; éste tenía un patín que descansaba directamente sobre las traviesas, a las que se aseguraba con un tirafondo; con la adición de una placa de asiento fue por fin generalmente adoptado, excepto en Inglaterra.

Con respecto al ancho de vía, la práctica británica primitiva ha tenido gran influencia. El ferrocarril de Surrey, abierto desde Croydon a Wandsworth en 1805, que fue el primer ferrocarril público, tenía un ancho de vía de sólo 1,219 metros; pero los experimentos que condujeron a la sustitución de la tracción animal por la locomotora de vapor en el curso de la década de 1820 (p. 484) tuvieron lugar princi-

palmente en Tyneside, donde la anchura tradicional entre las ruedas de la vagoneta de carbón era de 1,435 metros, tradición que puede provenir del antiguo camino de rodadas. Por ello el ancho de vía que se adoptó para el ferrocarril Stockton-Darlington en 1824 fue imitado por otros ferrocarriles británicos de la primera época, y era en efecto muy apropiado al bajo centro de gravedad de las locomotoras primitivas. El polifacético inventor Richard Roberts propuso un ancho de vía de 1,600 metros, pero en la práctica la principal excepción fue el Gran Ferrocarril del Oeste de I. K. Brunel; su ancho de vía de 2,139 metros era más caro en movimiento de tierras y en construcción, pero proporcionaba una forma de viajar más confortable con un material móvil más cómodo tirado por locomotoras más potentes. En 1846 se adoptó oficialmente el ancho de vía más estrecho, aunque el Gran Ferrocarril del Oeste no cambió la última de sus vías anchas hasta 1892. Los ingenieros británicos en el extranjero adoptaron generalmente el ancho de vía a que estaban acostumbrados en su país, mientras en América el ancho de 1,435 metros fue aprobado por el presidente Lincoln para la línea de la Unión Pacífico y se convirtió en la norma, como en Inglaterra, en 1885. Pero en Irlanda, la península ibérica y Finlandia se establecieron vías anchas, así como para las grandes distancias en Rusia y la India. Las vías estrechas, hasta de 60 centímetros menos, fueron usadas donde importaban más los gastos de construcción que la capacidad o la comodidad.

En el año 1840 la red británica de ferrocarriles aumentó en proporción asombrosa y el tráfico se hizo más denso. Aunque la especuladora manía ferroviaria de mediados de la década proporcionó la ocasión inmediata de este rápido crecimiento, hay que decir que fue el progreso tecnológico el que lo hizo posible, y en particular el aumento de la fuerza de tracción de las locomotoras. Las primeras líneas importantes (Londres-Birminghan, Londres-Bristol)

planearon sus trazados de manera que tuvieran la pendiente mínima; pero en 1840 se hizo posible que el ferrocarril Birmingham-Gloucester funcionara en un tramo de unos tres kilómetros sobre las colinas de Lickey con un declive de 1 por 38, e incluso dejaron entonces de asustar las líneas previstas a Escocia. En cuanto a velocidad y regularidad de servicio, las dos cualidades en que el transporte por carretera y por canal era ineludiblemente deficiente, en 1849 cinco locomotoras consiguieron entre Londres y Bristol velocidades medias que excedían los 80 kilómetros por hora, y para entonces la *Guía* de Bradshaw había estado anunciando horarios exactos de trenes durante diez años.

La multiplicación de los empalmes, las mayores velocidades y la intensificación del tráfico exigieron el desarrollo de un complejo sistema de señales. En los primeros años se había considerado suficiente colocar una señal de «peligro» durante cierto período convenido siguiendo el camino de cualquier tren particular, siendo mayor el riesgo de este sistema por el hecho de que cada compañía tenía su tipo propio

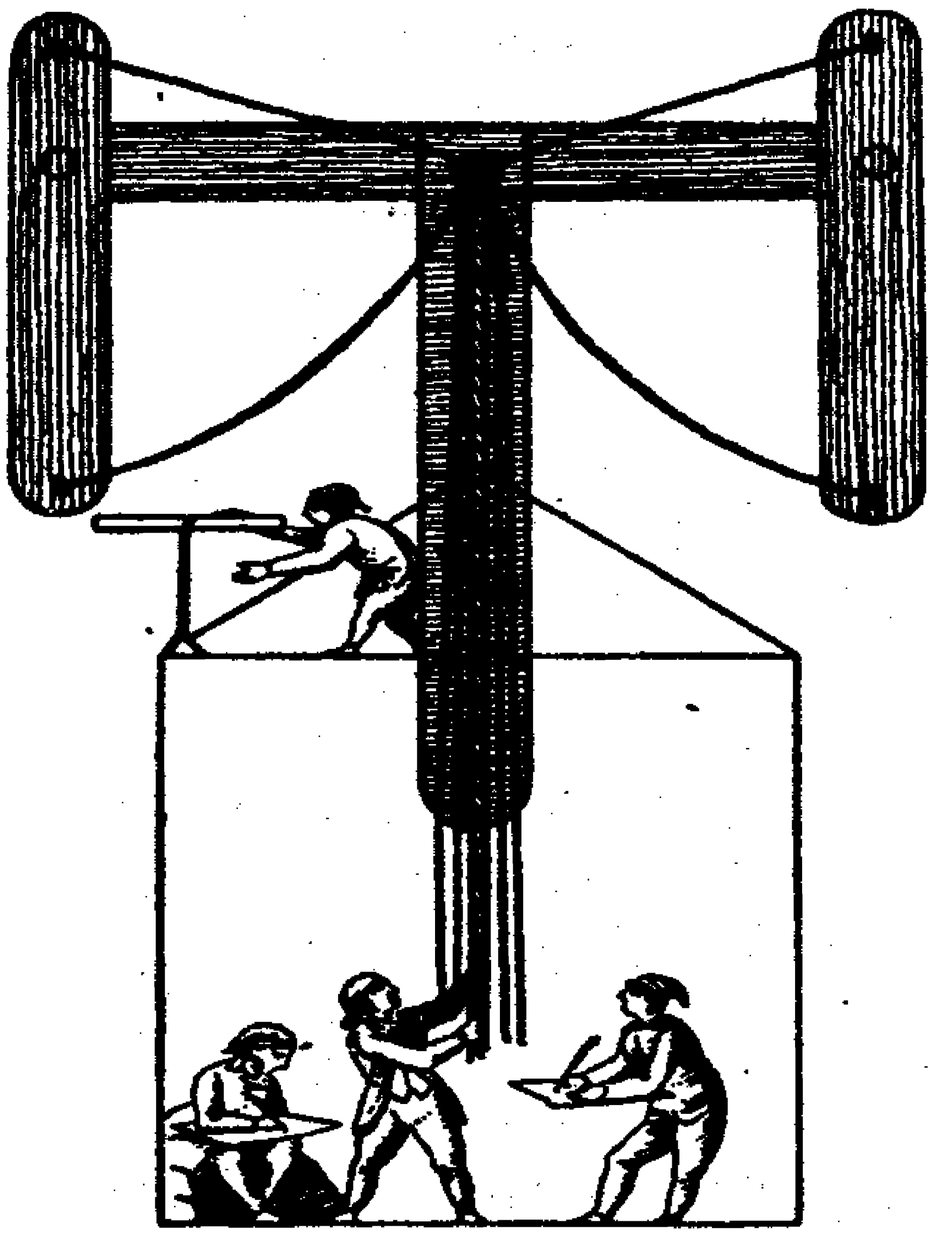


Fig. 178. Semáforo de Chappe para retransmitir mensajes a larga distancia.

de señales. Pero después de un ensayo en la línea Londres-Croydon en 1840 se advirtió que el semáforo, que había sido inventado por Chappe para transmitir las órdenes del gobierno revolucionario francés en 1793 (fig. 178), era particularmente apropiado a las necesidades pacíficas del ferrocarril. Por este tiempo empezó a usarse para transmitir información

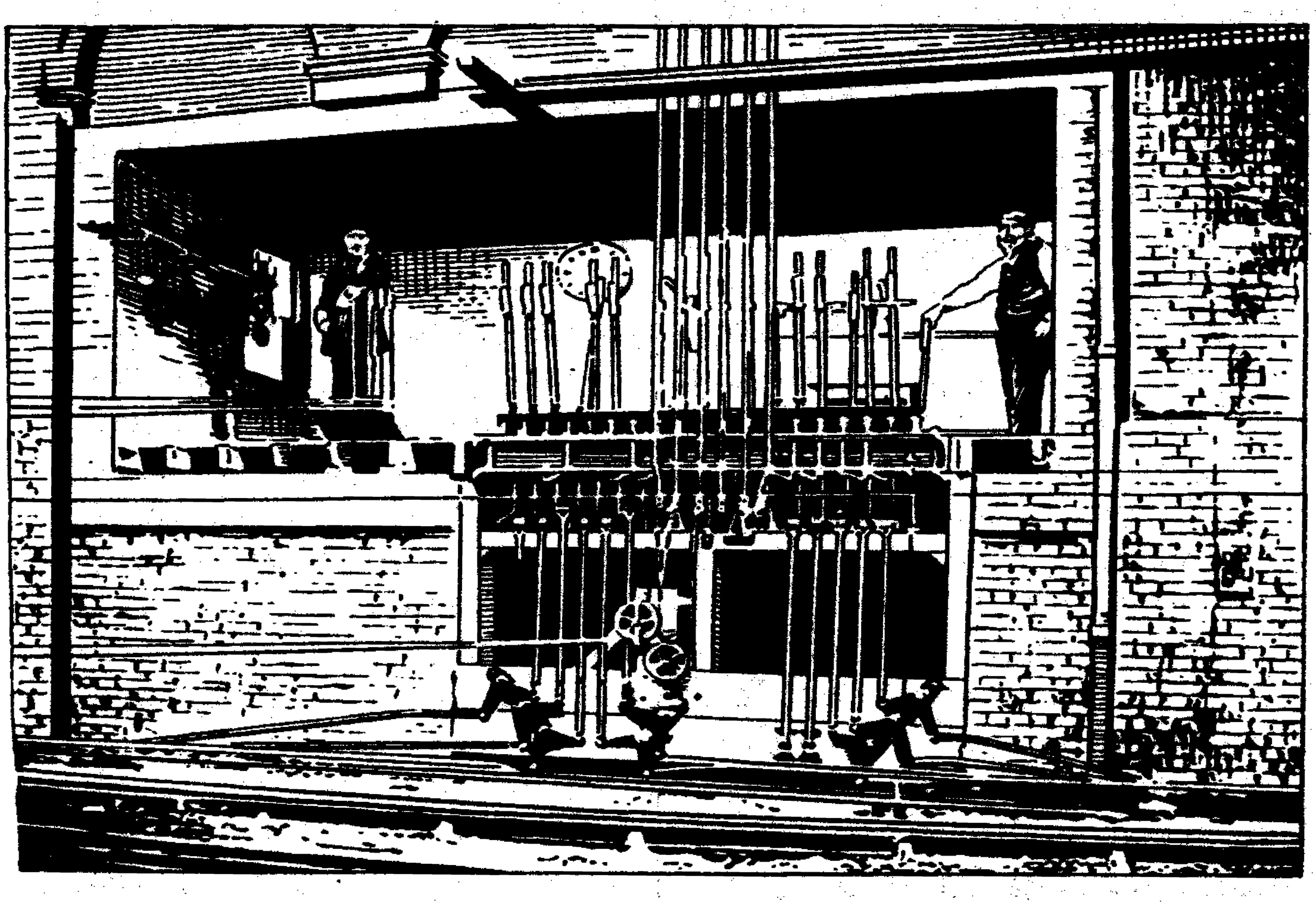


Fig. 179. Puesto de señalización primitivo. Estación Victoria, Londres.

entre las estaciones el telégrafo eléctrico en su forma más primitiva: la primera de estas instalaciones se realizó entre Paddington y West Drayton (1893). El telégrafo eléctrico hizo posible introducir gradualmente el sistema de tramos, dividiéndose la línea mediante puestos de señalización (fig. 179); no se admitía ningún nuevo tren en un tramo hasta que la salida del precedente había sido comunicada por el guardavía en el extremo más alejado. Más avanzado

el siglo, ésta llegó a ser la práctica normal en vigor en todas las principales líneas británicas y en la mayoría de las europeas. La interconexión de agujas y señales empezó a utilizarse en importantes empalmes de Londres —primero en el ferrocarril del empalme de Hampstead en 1859— y fue patentado, pero los países donde las distancias eran mayores se contentaban casi todos con vías únicas y un sistema de señales mucho más simple. En América se utilizaron mucho durante tiempo las órdenes telegráficas para los trenes para controlar una vasta red de una sola vía, aunque ya en 1860 el Ferrocarril de Londres y el Noroeste había proyectado el sistema de «bastón piloto», por el cual el cambio de una señal hacía imposible que entraran por error dos trenes en la misma sección de vía única desde extremos opuestos.

La segunda mitad del siglo conoció grandes mejoras en los propios carriles. Como en la construcción naval, el cambio principal fue la sustitución del hierro por el acero, que resultó ser unas quince veces más duradero. El primer trabajo en este sentido por cuanto concierne a los ferrocarriles se hizo en Crewe, donde se fabricaba acero Bessemer y se laminaba en carriles, habiéndose realizado con éxito las primeras pruebas en 1862. En Pensilvania en 1867 se estaban haciendo carriles de acero para los ferrocarriles americanos, en rápida expansión, y en 1869 se firmaron contratos de importación con una firma de Sheffield. Aunque los carriles de acero podían ser más ligeros que sus equivalentes de hierro, aumentaron de peso para adaptarse a las exigencias de trenes más pesados y rápidos. Hubo también una mejora en las juntas de los carriles. Antes de los años cincuenta los extremos de los carriles eran sencillamente enchavetados en un cojinete común, pero R. L. Stevens introdujo entonces en América las eclisas, planchas estrechas empernadas al alma de cada par de extremos de los rieles por ambos lados.

Desde el punto de vista del público viajero, sin embargo, lo más notable de cualquier ferrocarril

eran sus estaciones. Al principio servían tanto de cobertizos para los vagones como de resguardo para los viajeros, y aun cuando las grandes estaciones terminales urbanas empezaron a tener enormes techos abovedados de hierro y acero (p. 597), su espléndida espaciosidad venía exigida en gran parte por consideraciones técnicas de iluminación y ventilación, que provenían de la necesidad de movimiento de muchedumbres e innumerables bultos en un espacio limitado, mientras las locomotoras esperaban lanzando vapor. Las estaciones terminales metropolitanas en forma de abanico, la disposición de los andenes como islas flanqueadas por vías a cada lado y la completa separación de las estaciones de mercancías y de viajeros fueron tres soluciones de la época victoriana al difícil problema técnico de hacer una gran estación de ferrocarril accesible tanto para el ferrocarril como para sus presuntos usuarios.

Hacia finales de siglo se recurrió en algunas zonas urbanas al expediente costosísimo de introducir el ferrocarril bajo tierra. Se empezó en 1863 con el ferrocarril metropolitano, que atravesaba el centro de Londres por un túnel construido justo bajo el nivel de la calle (fig. 180). Una de sus pincipales funciones era la de servir de enlace entre las principales estaciones de ferrocarril al norte del río, y funcionaba

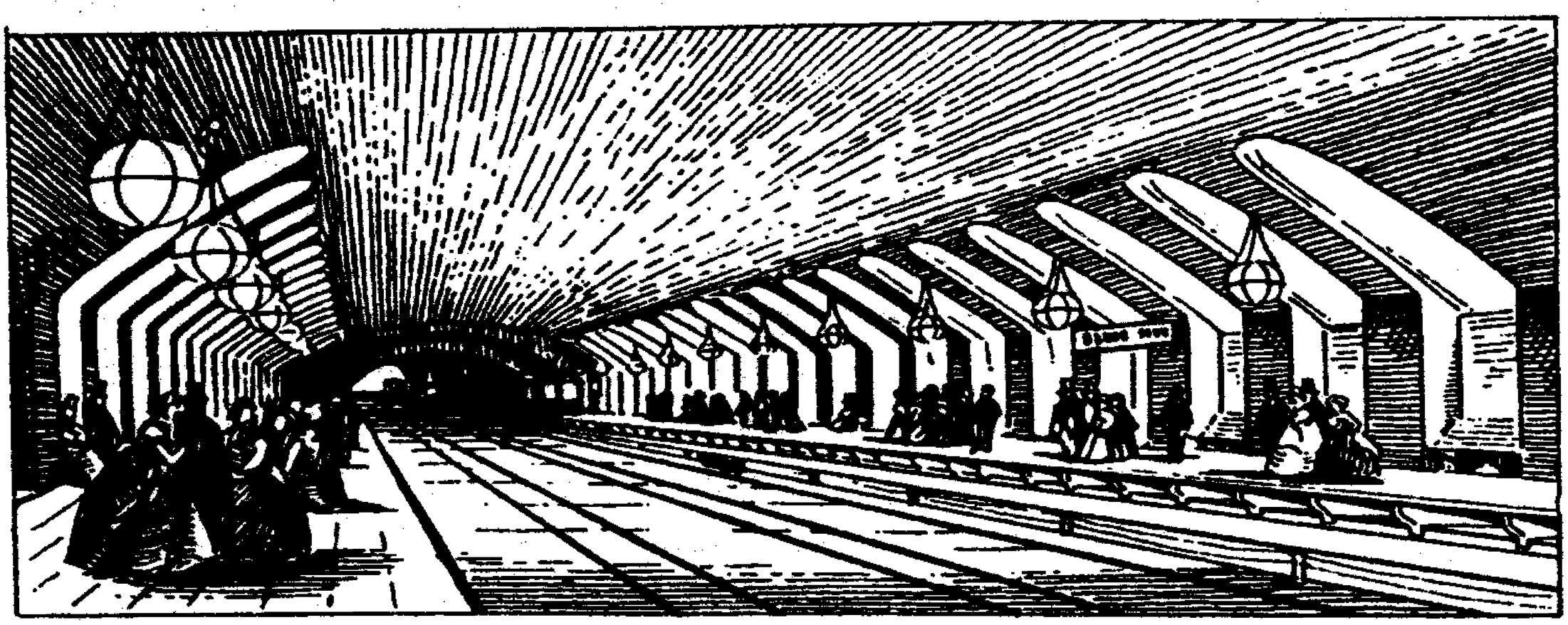


Fig. 180. Estación de Baker Street, Londres, 1863.

con locomotoras de vapor provistas de condensadores de superficie, que estaban destinados —aunque con frecuencia no lo lograban— a lograr que el aire no llegara a ser completamente intolerable en los túneles. El primer «metro» en el sentido moderno fue el Ferrocarril de la City y el Sur de Londres, que pasaba bajo el cauce del Támesis y fue construido como un túnel, funcionando con locomotoras eléctricas de 150 cv. Fue inaugurado en 1890, y al final del siglo la terminación de dos líneas de «metro» más en Londres, la línea de Waterloo-City y la Central, probaron que se había encontrado una solución aceptable para el problema del tráfico de la capital, al mismo tiempo que en Glasgow también se había puesto en uso un ferrocarril subterráneo con tracción de cable. Aún más importante para el futuro fue la inauguración de la primera línea principal electrificada en América en 1895; fue instalada en un túnel de 6,5 kilómetros en Baltimore. El primer ferrocarril eléctrico, que era de 275 metros de largo y transmitía la corriente a su máquina de 3 cv a lo largo de un carril central, había sido mostrado en una exposición en Berlín en 1879, pero a finales de siglo la principal utilización de la electricidad para el transporte local era el tranvía.

El progreso material de la época victoriana está bien compendiado en el desarrollo del material móvil ferroviario de viajeros a partir del coche tirado por un solo caballo, diseñado por Stephenson, y propiedad de la Compañía Stockton y Darlington en 1825 (fig. 181). Mientras el viaje en ferrocarril fue una novedad y la velocidad por sí sola pudo atraer clientela, esto fue suficiente para la aparición del coche de primera clase, semejante al vehículo del que tomaba nombre, excepto que lo que habría supuesto tres o aun cuatro vehículos de tracción animal se montaba ahora en una sola estructura (fig. 182). En cuanto a la tercera clase, se parecía al coche abierto en el que unos pocos años antes podían haber esperado viajar sus ocupantes —a paso de andadura—:

Fig. 181. Coche de viajeros de Stephenson, tal como se mostró en el desfile de apertura del ferrocarril Stockton-Darlington.

el hecho de que el nuevo servicio estuviera expuesto a la intemperie y la incomodidad se perdonó al principio por el entusiasmo ante su conquista de la distancia. Estos coches primitivos tenían cuatro ruedas o, excepcionalmente, seis; el primer coche de ocho ruedas fue puesto en servicio en el Gran Ferrocarril del Oeste de vía ancha en 1852, pero tales vagones continuaron siendo una rareza durante veinte años. Aunque el *bogie* fue patentado por un inglés, William Chapman, en 1812, la provisión regular de *bogies* a cada extremo de un coche largo de viajeros para facilitar la toma de curvas fue una innovación americana, una valiosa precaución contra el descarrilamiento sobre vías tendidas imperfectamente.

América fue por delante en el diseño de coches de viajeros, no sólo porque las largas distancias convertían en una virtual necesidad la introducción de comodidades tales como coches camas, coches restaurantes y servicios, sino por la razón más interesante

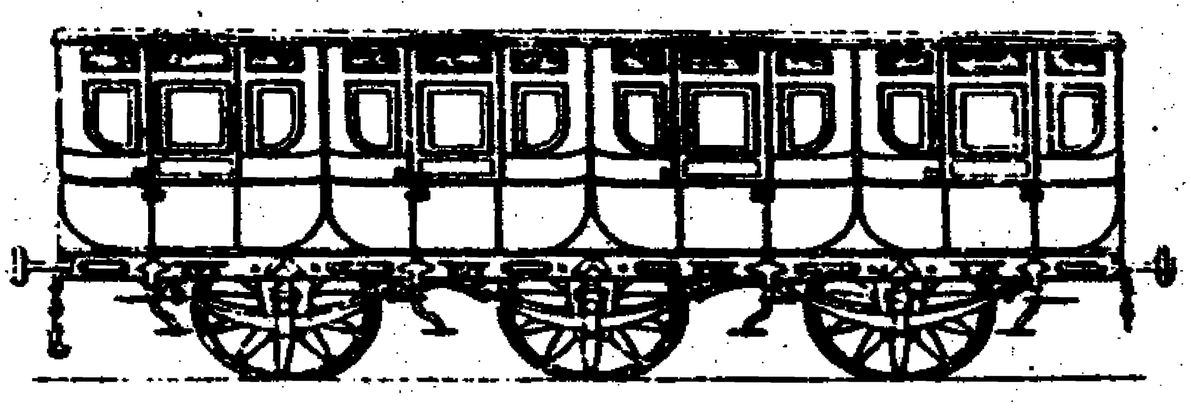


Fig. 182. Coche de primera clase. Gran Ferrocarril del Oeste, 1839.

de que el modelo más evidente a los ojos de los americanos no era un vehículo de tracción animal, sino el largo camarote del barco fluvial. Rusia fue una perfecta imitadora de la práctica americana. Un grado más alto de comodidad para los que la pagaran fue introducido en el sistema ferroviario británico con los primeros coches Pullman americanos importados en 1874. Al año siguiente, sin embargo, fue el ferrocarril de Midland el que marcó la pauta, que pocos países extranjeros intentaron siquiera igualar, con la introducción de asientos tapizados para todas las clases de viajeros. Lo que ahora es el tipo normal de coche británico de pasillo lateral, compuesto por pequeños compartimientos y con servicios en ambos extremos, vino por primera vez a Inglaterra en 1882 como una variante de un vehículo austriaco. La iluminación eléctrica producida por una dinamo situada bajo el coche no se patentó hasta 1896, aunque un coche Pullman alumbrado eléctricamente, importado de América, estaba circulando entre Londres y Brighton en 1881: en este coche la electricidad se obtenía a partir de baterías.

En otros dos importantes aspectos de la práctica ferroviaria, Norteamérica, con sus largas distancias, llevó también la delantera. En fecha temprana se adoptaron allí enormes vagones de mercancías con dos *bogies* y un enganche central automático. Europa, sin embargo, continuó arreglándoselas con pequeños vagones de cuatro ruedas, tales como podían haber sido los tirados por un tronco de caballos, y usando enganches de tornillo y topes laterales, que habían sido inventados en los años 1830; muchos de estos vagones están aún en uso. Aún más notable fue la indiferencia europea ante la necesidad de mejorar los sistemas de frenado. Robert Stephenson inventó un freno de vapor en 1833, pero todo lo que no fuera un freno de mano en el ténder y el furgón de equipajes fue considerado como un lujo durante mucho tiempo. En 1875, en una prueba realizada en Newark, el freno americano Westinghouse —que funcionaba

por aire comprimido, continuo y automático en caso de división del tren— demostró su capacidad para parar un tren de 200 toneladas a 80 kilómetros por hora en menos de 300 metros. En 1879 fue patentado por J. A. F. Aspinall un eficiente freno de vacío británico, treinta y cinco años después de haber obtenido Nasmyth la patente más antigua. Sin embargo, hasta que murieron ochenta personas en una colisión cerca de Armagh, en 1889, no se hicieron obligatorios para los trenes de viajeros británicos los frenos mecánicos continuos y automáticos. El resultado fue no sólo impedir muchos posibles desastres y tranquilizar al viajero preocupado, sino mejorar el cronometraje de los trenes expresos, permitiéndoles detenerse más rápidamente.

Aunque los ferrocarriles tuvieron su origen, como hemos visto, en las necesidades del tráfico de mercancías pesadas, especialmente de carbón, su desarrollo en Inglaterra en los primeros años de vida de la locomotora recibió un estímulo inesperadamente grande del tráfico de viajeros, que en los tiempos de su auge, hacia la mitad de la década de 1840, proporcionó casi dos tercios de las ganancias. Durante la segunda mitad del siglo la longitud de los ferrocarriles británicos aumentó de 10.650 a 35.160 kilómetros aproximadamente, y el número de viajeros transportados (sin contar los viajeros de cercanías, clase de viajeros indicativa del cambio social), de 73 millones a 1.142 millones al año. El peso total de las mercancías transportadas aumentó también enormemente, de 90 millones de toneladas en 1860 a 235 millones de toneladas en 1880 y a 425 millones de toneladas en 1900, pero su parte en los ingresos totales, aunque mayor que antes, nunca alcanzó el 60 por 100. En el mismo período los ferrocarriles de los Estados Unidos aumentaron desde una longitud de menos de 16.000 kilómetros en 1850 y unos 49.200 en víspera de la Guerra de Secesión, a unos 150.000 kilómetros en 1880 y unos 320.000 en 1900, siendo esta última cifra cerca de 47.000 kilómetros mayor que la longitud del

ferrocarril de toda Europa. Sus funciones fueron de paralela importancia: mientras que en Inglaterra y otros países europeos muy poblados el principal efecto del ferrocarril fue el de estimular la vida social y desarrollar el comercio de las comunidades existentes, en vastas regiones de América creó la comunidad y el comercio. En los ferrocarriles americaños, por tanto, con cuarenta vagones de mercancías por cada coche de viajeros, más del 75 por 100 de los ingresos provenía del tráfico de mercancías.

Se ha hecho ya mención del tranvía eléctrico (página 557). Cuando la locomotora de vapor reemplazó a la tracción animal para el transporte de larga distancia por carril, el ómnibus de caballos —traído de París a Londres en 1829— estaba empezando a ser usado como vehículo popular. Los carriles tenían obvias ventajas para un vehículo pesado arrastrado a lo largo de superficies de adoquines, de modo que el primer coche de tranvía, con una caja de ómnibus de 30 asientos montada sobre cuatro ruedas con reborde, corrió a lo largo del Bowery, en Nueva York, ya en 1832. El sistema se extendió a algunas otras ciudades americanas, a París en 1855 y a Birkenhead y Londres en 1860-61. Pero ni el carril con una ranura ancha y profunda, que se adoptó al principio, ni el carril de zapata de 127 milímetros con un escalón de 22 milímetros a un lado, introducido en Filadelfia y que fue el primer tipo instalado en Inglaterra, estaban exentos de riesgo para el resto del tráfico. En consecuencia, el primer tranvía de Londres fue suprimido, pero el moderno carril de ranuras planas se introdujo a tiempo de salvar la situación en las provincias, habiendo sido promulgada una ley sobre tranvías (1870) para fomentar el desarrollo local. Los métodos de tracción empezaron también a mejorarse hacia el fin de la década, cuando la introducción de carriles de doble T proporcionó un tipo de vía más fuerte. Como los caballos o mulas, hasta un número de cuatro, mantenían una velocidad media de sólo 9,5 a 11 kilómetros por hora, se hizo uso de la

fuerza motriz producida por el vapor, a veces por medio de un cable subterráneo de alambre unido a una máquina fija, y más corrientemente por medio de una locomotora acoplada al coche. Sin embargo, el tranvía de vapor era ruidoso y sucio. En Inglaterra sólo fue popular en los distritos industriales: hay muchas referencias a él en las descripciones que hace Arnold Bennett de The Potteries; en otros lugares se mantuvo la tracción animal hasta la última década del siglo.

Los tranvías eléctricos, que obtenían su energía de tendidos aéreos y mostraban un gran parecido a los que aún se usan en muchas ciudades continentales, estaban ya en uso en Alemania hacia 1884 (fig. 183), habiendo sido construido el primer sistema general de tranvías de trole aéreo en los Estados Unidos, en Richmond, Virginia, en 1888. En Inglaterra la trac-

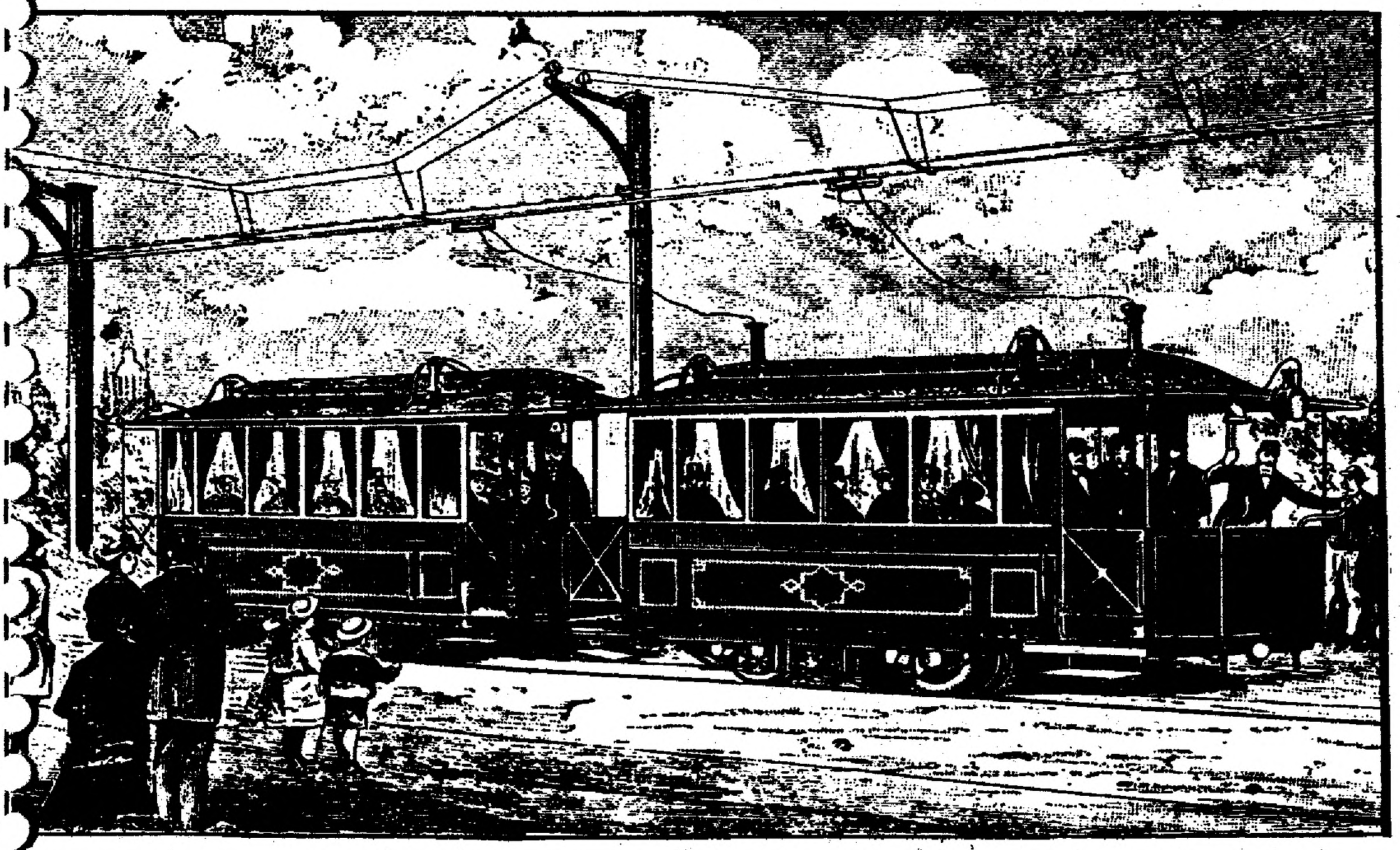


Fig. 183. Tranvía eléctrico entre Frankfurt-am-Main y Offenbach, con suministro aéreo, 1884.

ción eléctrica fue instalada con éxito en Leeds en 1891; siguieron otras grandes ciudades, pero diez años después Londres no tenía transformados más de 25 kilómetros. La edad de oro de los tranvías vino luego rápidamente, aunque en Inglaterra su valor para la comunidad estuvo siempre restringido por sus provincianos sistemas de administración: Leeds y Bradford, por ejemplo, a pesar de estar tan próximas, persistieron en sus respectivos anchos de vías de 1,435 y 1,219 metros.

EL LOCOMOVIL DE VAPOR PARA CARRETERA Y LA BICICLETA

El ferrocarril trajo enormes ventajas sociales y económicas, no sólo por reducir la barrera física de la distancia, sino por rebajar la no menos frustrante barrera de clase. El viajar sin acompañamiento de ningún tipo de segregación se puso verdaderamente al alcance de todos, excepto los muy pobres, pero era una forma de viajar disciplinada, y como las carreteras quedaron vacías y silenciosas el individuo pareció perder algo de la libertad de expresión que encontramos en los viajeros británicos de la época preferroviaria tal como la describen Borrow, Surtees o Dickens. El desarrollo de los vehículos mecánicos para carretera, que culmina en el último cuarto de siglo, tiene por eso un interés muy superior al modesto lugar que ocupó en la vida económica de una época en la que el automóvil era aún una curiosidad, mientras las bicicletas, aunque numerosas, apenas habían descendido ni siquiera a los usos prácticos de los recaderos.

A primera vista resulta algo notable que ni el vapor ni la electricidad hubieran hecho posible todavía un vehículo para carretera satisfactorio en general para todos los usos. El primer precursor fue N. J. Cugnot en Francia, que en 1769 hizo moverse a paso de andadura un vehículo de tres ruedas im-

pelido por vapor (véase fig. 150). La idea había llamado también la atención del inventor americano Oliver Evans, y del empleado de Boulton y Watt William Murdock, antes de que Trevithick construyera sus vehículos de vapor (p. 482). Le siguió un colega de Cornualles, Sir Goldsworthy Gurney, quien en 1831 perfeccionó un vehículo de vapor que proporcionó servicio regular entre Gloucester y Cheltenham —14,5 kilómetros en cuarenta y cinco minutos—; a los tres años había ya un ómnibus impelido por vapor en Londres, que cubría un trayecto de unos 13 kilómetros en menos de una hora, consumiendo un saco de coque, y vehículos similares en las cercanías de Glasgow y otras grandes ciudades. El vehículo de vapor de Church (fig. 184) es aproximadamente de la misma fecha. Pero los propietarios de diligencias y otros cuyos intereses se veían amenazados arrojaron a los nuevos vehículos de las carreteras por medio de peajes gravosos: la Comisión de Caminos de Portazgo de Liverpool-Prescot, por ejemplo, cobraba 4 chelines por un coche ordinario y 48 chelines por un coche de vapor. El triunfo de la locomotora de ferrocarril en las dos décadas siguientes tuvo un do-

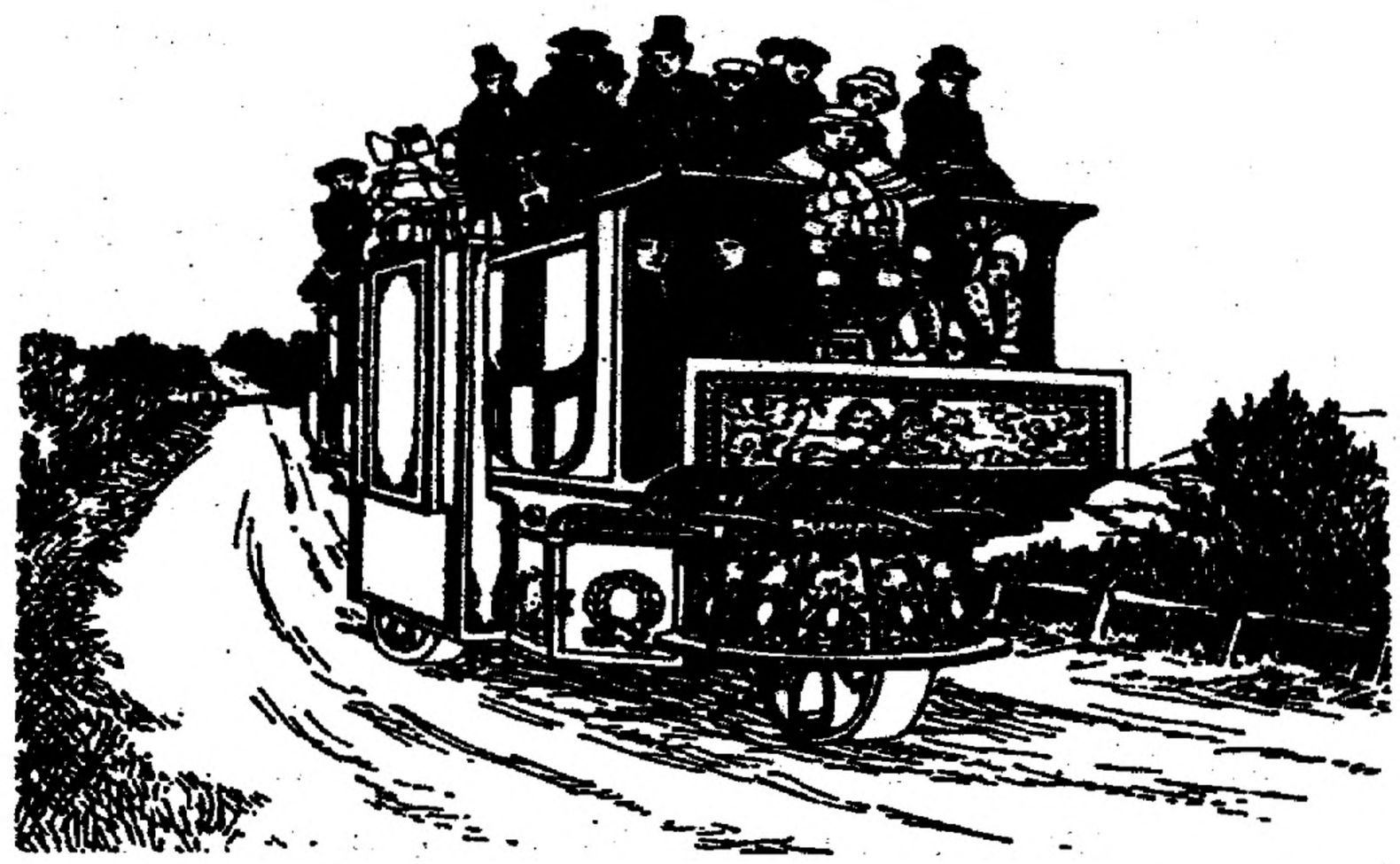


Fig. 184. Vehículo de Church para carretera impulsado por vapor, 1833.

ble efecto. Por una parte, sugirió que un locomóvil de carretera debía ser también plenamente practicable; por otra, creó un poderoso y nuevo negocio que naturalmente trató de cerrar el paso al tráfico por carretera. En Inglaterra, la llamada Ley del Banderín Rojo de 1865, tal como fue enmendada en 1878, limitó la velocidad de todos los vehículos mecánicos para carretera a 6,5 kilómetros por hora y les obligó a llevar un equipo de dos hombres con un tercero que fuera delante para advertir de su paso.

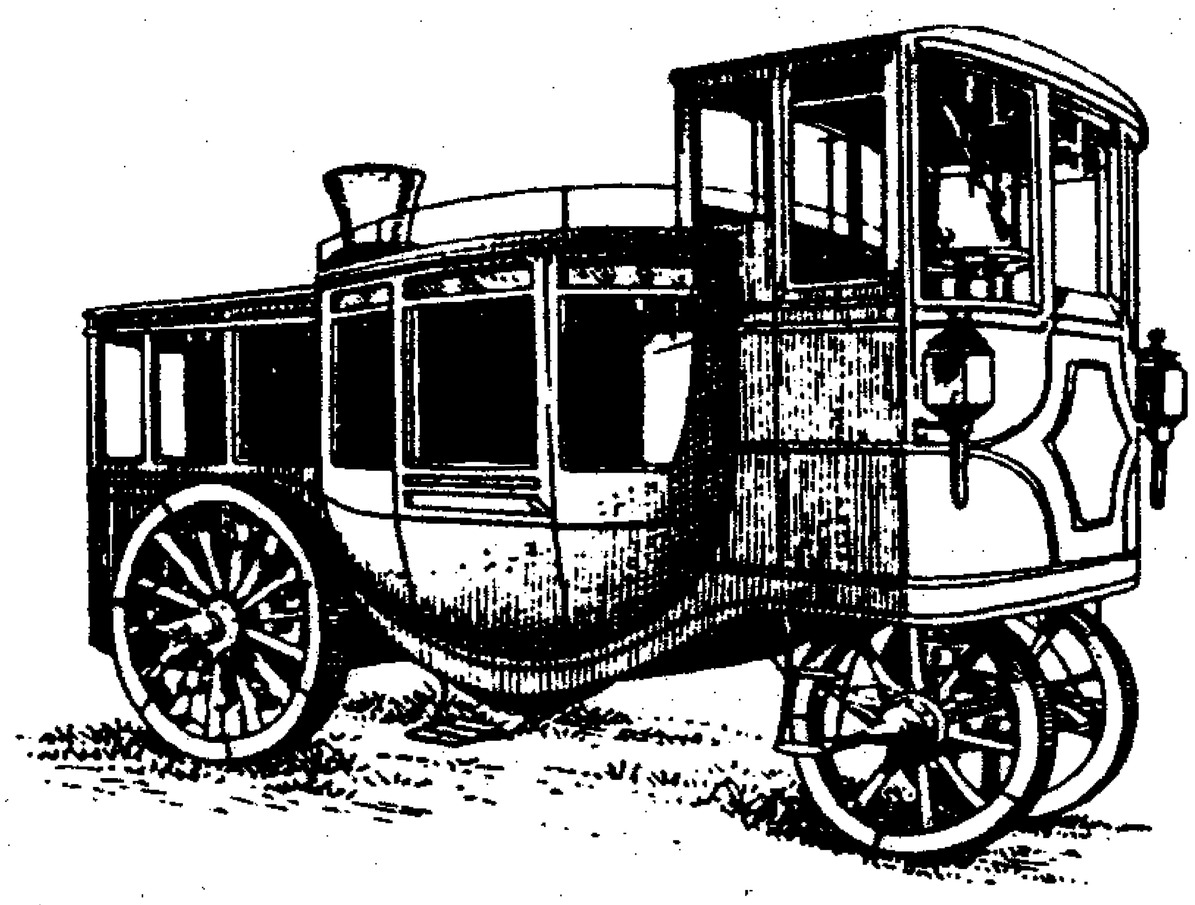


Fig. 185. Coche de vapor, de Randolph, 1872.

El locomóvil de vapor para carretera inventado por Thomas Rickett en 1858 parecía un curioso cruce entre una máquina de ferrocarril y un coche de inválido. Tenía tres asientos detrás de la palanca de maniobra, llevaba un fogonero de pie en la plataforma de atrás, y la fuerza le era transmitida sólo a la rueda trasera derecha. Siguieron otros modelos, que variaron desde un coche de vapor enteramente cerrado (fig. 185), que podía pesar unas 4,5 toneladas, al triciclo de vapor (fig. 186), fabricado en Francia en los años 1880. Uno de los fabricantes de triciclos de vapor Léon Serpollet, inventó un generador instantáneo de vapor que funcionaba bombeando una pequeña cantidad de agua a través de serpentines al rojo hechos con tubería de acero al níquel. Lo adaptó a un motor de cuatro cilindros para un coche de vapor

en 1894, y con apoyo financiero americano este vehículo llegó a ser bien conocido en Inglaterra y Francia. También en América llegó el éxito al final mismo del siglo, cuando un motor de dos cilindros —provisto, como algunos de los últimos modelos de Serpollet, de un quemador de petróleo— fue utilizado por los hermanos Stanley para mover un vehículo de madera de dos asientos con un peso total de sólo unos 350 kilogramos. Sus coches de vapor gozaron de una boga considerable hasta que llegó la nueva era en que el Ford modelo «T» barrió el mercado.

Fig. 186. Triciclo de vapor, de Serpollet, 1887.

Sin embargo, sólo la máquina de tracción a vapor tuvo un futuro largo. Ya en 1871 había un tipo de locomóvil de vapor para carretera con cubiertas de caucho macizo, fabricado en Aberdeen, que fue exportado hasta la India, donde tiró de omnibuses de dos ruedas. Pero el aspecto principal de su desarrollo fue el arado de vapor, puesto en servicio por primera vez alrededor de 1850 en forma de máquina portátil colocada al extremo de un campo para arrastrar un arado a lo largo del mismo con un cable metálico. Media docena de años más tarde se juzgó más conveniente que la misma máquina se moviese

de un lado a otro del campo. En 1870 la máquina de tracción movida por vapor, con el cilindro delante de la caldera, transmisión por engranajes y dirección de las ruedas desde el asiento del conductor, había alcanzado su forma moderna. Su fuerza de tracción era muy grande, por lo que pasó mucho tiempo antes de que los pesados tractores y remolques de gasolina pudieran competir con ella eficazmente, en especial en el norte industrial; como máquina al servicio del empresario de espectáculos, que podía usarse también para trasladar los artefactos que arrastraba de feria en feria, duró aún más tiempo. Pero hoy día el único locomóvil de vapor que virtualmente puede encontrarse aún en las carreteras es algún que otro ejemplo de la pesada y casi imperecedera apisonadora (véase fig. 217), propulsada por vapor por primera vez en 1867.

El locomóvil de vapor para carretera era practicable pero molesto; el vehículo eléctrico autosuficiente, un modelo de transporte ideal pero impracticable. Su historia comienza cuando los acumuladores adecuados (p. 899) se hicieron asequibles, hacia 1880, y en rápida sucesión fueron producidos experimentalmente un triciclo, un cabriolé y un *dog-cart*. En 1899 un coche fusiforme construido por un belga estableció un récord mundial de velocidad en tierra de casi 106 kilómetros por hora, pero en el mismo año la London Electric Cab Company, con treinta y seis cabriolés en uso y más de ese número en construcción, se extinguió después de sólo dos años de funcionamiento. Estos cabriolés son descritos como pesados, lentos y espasmódicos, pero sus contemporáneos, el *hansom* y el *growler*, tenían también sus limitaciones. El diseño era bonito, y aunque la batería limitaba el recorrido a 80 kilómetros con una sola carga, se tomaron medidas para su rápida reposición. Sin embargo, la limitación impuesta por la necesidad de llevar y recargar pesados acumuladores impidió que los coches eléctricos se hicieran populares y dio el futuro al automóvil de gasolina.

Mientras tanto la bicicleta, que aportó nueva vida a las carreteras, aventura a los jóvenes y emancipación al sexo débil, fue un acontecimiento tecnológico que en los años 1880 y 1890 hizo mucho para transformar las horas de ocio del hombre civilizado. La idea de propulsarse uno mismo con los pies, sentado a horcajadas en una máquina de dos ruedas, es anterior al siglo XIX, pero fue en 1818 cuando un alemán, el barón Drais, patentó su «draisina» (fig. 187). Llevaba una almohadilla en la parte delantera del cuadro para que el que montaba pudiera apoyarse hacia adelante y obtener el máximo impulso de sus patadas; la primitiva barra de la dirección tenía una

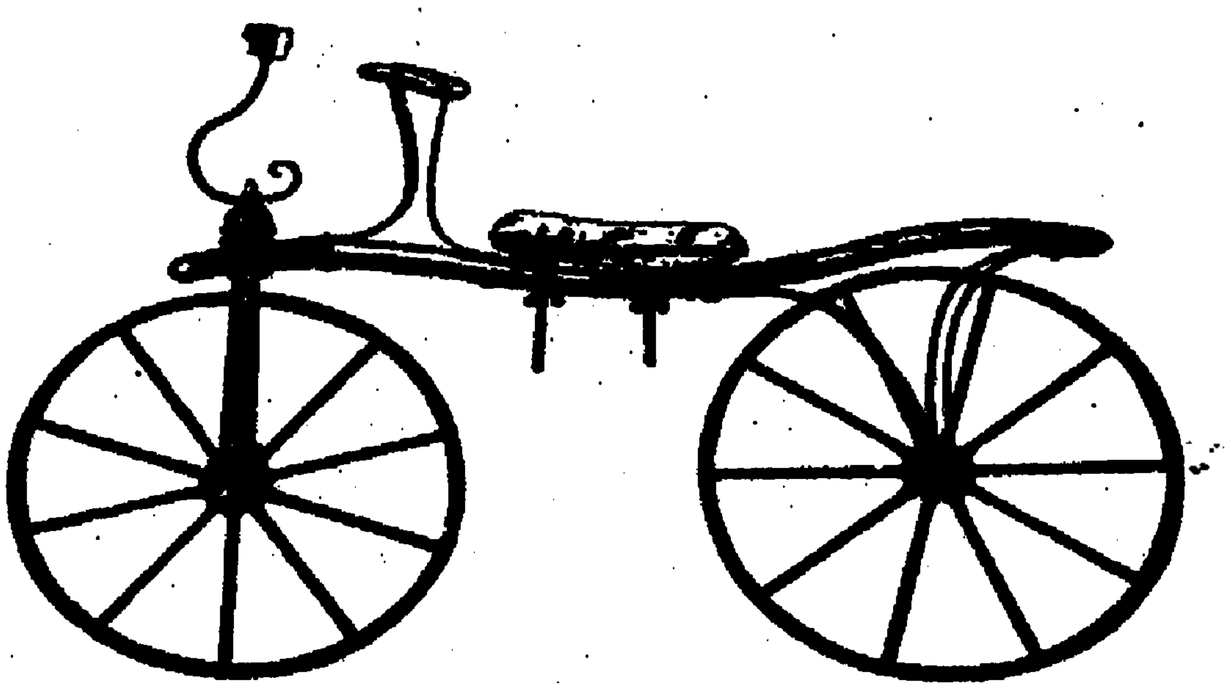


Fig. 187. El velocípedo. Hacia 1818.

importancia adicional por el hecho de que no había freno. Los pedales unidos a la rueda trasera —que consideramos característica esencial de la bicicleta— fueron añadidos, unos veinte años después, por un escocés, K. Macmillan, que introdujo también un freno; pero fue un francés, Pierre Michaux, quien, en la década de 1860, situó los pedales directamente en la rueda delantera y formó una compañía para fabricar sus «velocípedos». La industria de la bicicleta (como su concomitante, las carreras de bicicletas) empezó así en Francia, desde donde se extendió a Coventry en 1869. Quince años después había más de 200 variedades en el mercado, si incluimos los tándems (fig. 188), así como los biciclos con dos ruedas paralelas, triciclos y aun vehículos de cuatro ruedas.

Durante largo tiempo el tipo predominante, la bicicleta «ordinaria» o *penny-farthing*, fue aquella en la que el ciclista estaba en equilibrio precario sobre la rueda delantera, que se hacía tan grande como era posible para que fuera máxima la distancia cubierta por la rueda a cada revolución de los pedales (figura 189). La aplicación de la transmisión por cadena

Fig. 188. Diseño de tándem, 1869.

a la rueda de atrás fue lo que hizo posible el modelo originariamente conocido como bicicleta «de seguridad», en la que se consiguieron un equilibrio más satisfactorio y una mejor dirección y frenado volviendo a colocar al ciclista entre dos ruedas de igual dimensión, aunque con la mayor parte de su peso sobre la rueda de atrás. Este tipo de máquina fue bosquejada por primera vez en 1876, pero el éxito comercial no se consiguió hasta la bicicleta de Rover de 1885

(fig. 190). Aparte de la introducción de la motocicleta (que se considerará en el siguiente apartado), a finales de siglo se hicieron otras dos importantes innovaciones que llevaron sustancialmente a la bicicleta a su actual grado de desarrollo. Una fue la rueda libre; la otra la mejora de la dirección al curvar la horquilla para alinear la columna de la dirección con el punto de contacto de la rueda con el suelo.

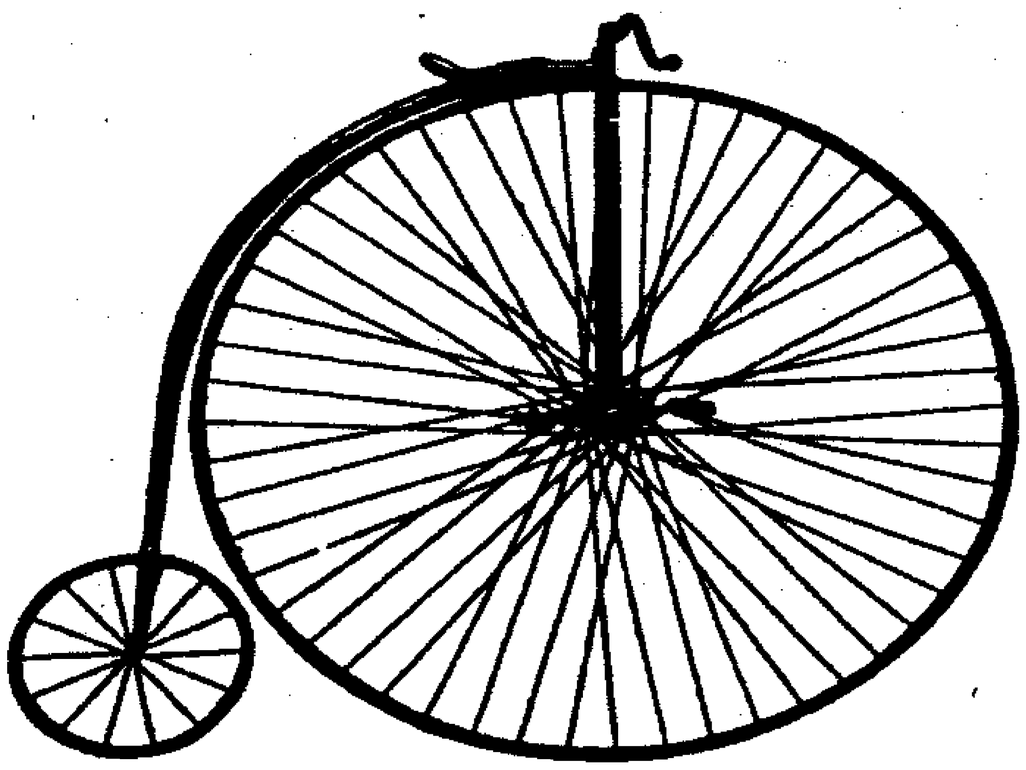


Fig. 189. Bicicleta «ordinaria», de Rudge, 1884.

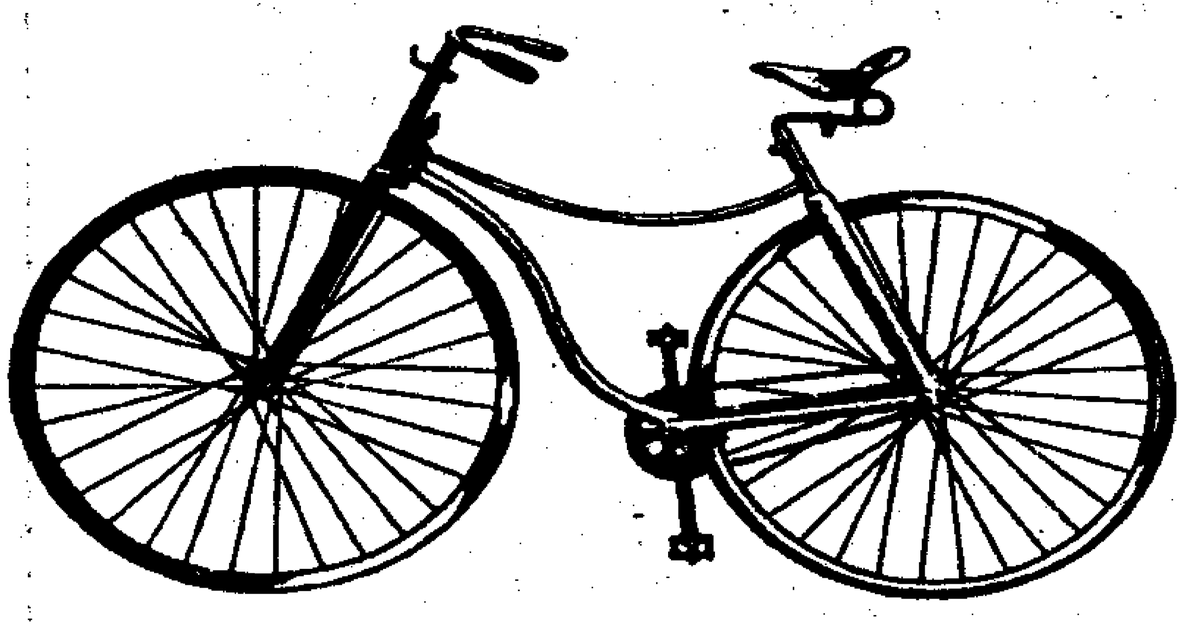


Fig. 190. Bicicleta de seguridad, de Rover, 1885.

En 1888 un veterinario de Belfast, J. B. Dunlop, inventó para su hijo de diez años el neumático (página 771). Este invento había sido patentado ya en 1845, pero en aquel tiempo la demanda de carruajes de tracción animal que corrieran más suavemente no fue suficiente para su éxito comercial. Pero mientras que en un carruaje gran parte de la vibración producida por la sacudida de las ruedas era absorbida por la suspensión, el contacto del ciclista con el suelo era mucho más directo, de modo que el neumático se convirtió rápidamente en parte del equipo normal. El mismo invento resultó también aplicable a las necesidades del recién llegado automóvil.

LOS AUTOMOVILES PRIMITIVOS

Aunque los vehículos de gasolina en su forma moderna se habían desarrollado a finales del siglo, a diferencia de los vehículos propulsados mecánicamente que hemos considerado hasta ahora, su impacto social se produjo más tarde. Los vehículos de vapor tuvieron, como hemos visto, un modesto éxito, especialmente para el transporte pesado, pero tenían desventajas que limitaban su atracción para el usuario privado. No sólo eran lentos y molestos, calurosos y sucios —pues los viajeros tenían que sentarse necesariamente muy cerca de la caldera—, sino que necesitaban una considerable preparación antes de poder hacer el viaje y también frecuente atención mientras duraba éste. Muchos de estos inconvenientes se podían haber reducido con el tiempo si el advenimiento del coche de gasolina no hubiera ofrecido ventajas tan inmediatas que quedó poco incentivo para proseguir los intentos de mejorar los coches de vapor.

La evolución del motor de combustión interna se describe en otra parte de este libro (cap. 21): aquí sólo nos importa su aplicación al transporte. Se dice que un inventor austriaco, Siegfried Markus, montó tal motor sobre un carro de mano hacia el año 1864, y el Museo Técnico de Viena guarda todavía un vehículo construido por él unos diez años más tarde. Este vehículo es un objeto pesado, tosco, con un motor de cuatro tiempos monocilíndrico, capaz de alcanzar sólo ocho kilómetros por hora de velocidad máxima, y conducido con un volante de mano que hace girar sobre un eje todo el avantrén, como en un carro. Sin embargo, nada salió de los inventos de Markus, y Karl Benz, natural de Mannheim, puede ser considerado con propiedad como el padre del automóvil. El vehículo ligero monocilíndrico, construido por primera vez por él en 1885 y conducido al año siguiente por las calles de Munich, tenía un ci-

güeñal vertical en la parte posterior del coche y una transmisión por correa que podía moverse desde una polea fija a una polea loca, actuando así como embrague para permitir al motor entrar en punto muerto (fig. 191). Una pequeña palanca de mano controlaba la única rueda delantera; la velocidad era de unos 13 kilómetros por hora. Ocho años más tarde Benz perfeccionó su diseño con un coche de cuatro ruedas con cigüeñal horizontal, como en todos los coches modernos, y transmisión por correa con dos velocidades; este coche, de 3,5 cv, se construyó a cientos a finales del siglo.

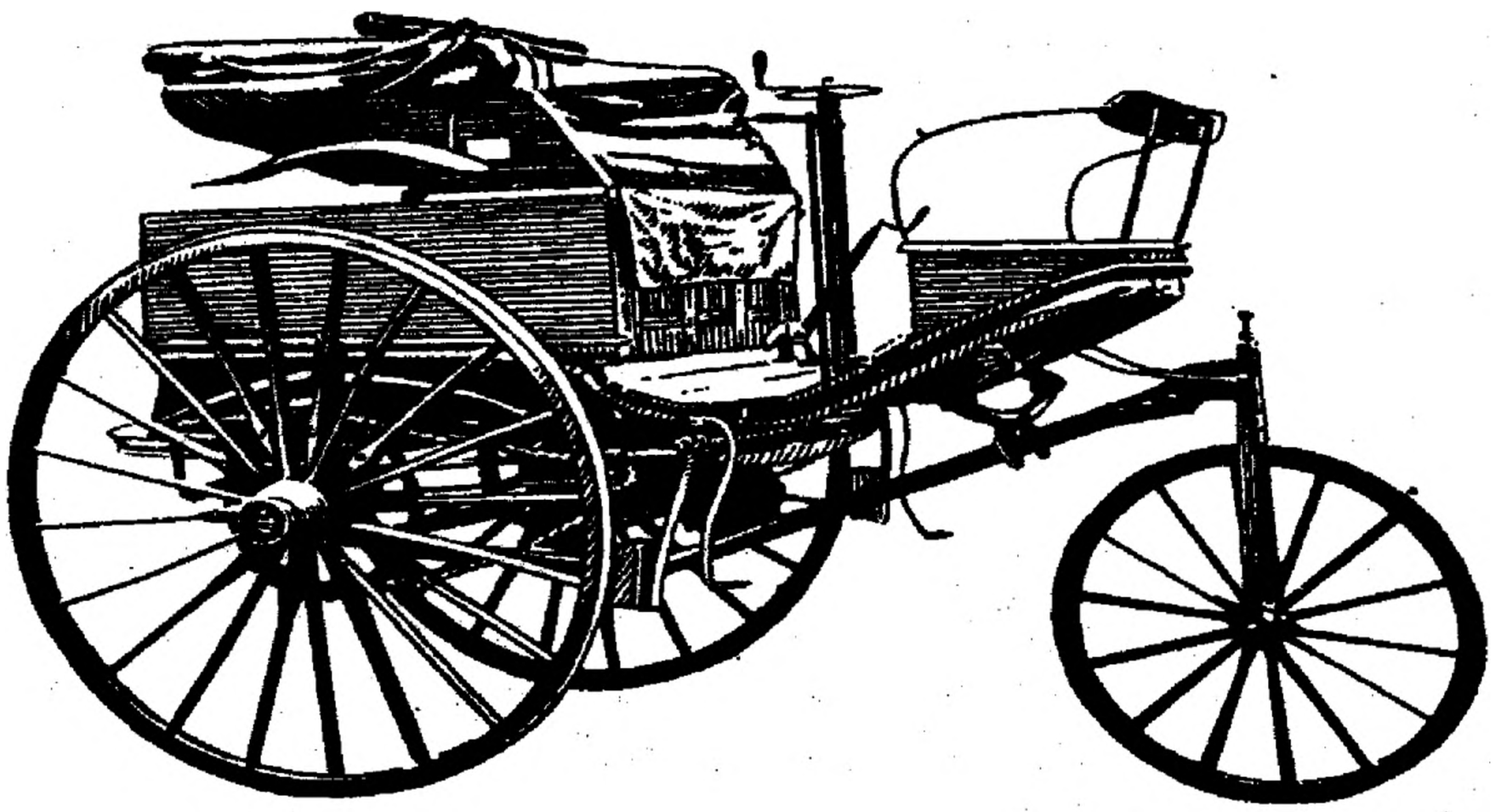


Fig. 191. Automóvil de Benz, 1888.

El lanzamiento del primer diseño de Benz fue seguido inmediatamente por el primer motor de gran velocidad, logro de otro alemán, Gottlieb Daimler, establecido en Württemberg. Su motor compacto, vertical, monocilíndrico (p. 888), que giraba mucho más rápido que el de Benz, fue probado en una motocicleta en 1886, y en 1887 en la parte posterior de un coche experimental. Luego Daimler realizó varios diseños de automóviles de cuatro ruedas, todos con transmisión por correa, que se construyeron en la

fábrica de Cannstatt cerca de Stuttgart, siendo los antecesores de los coches Mercedes.

El primer inventor inglés en este terreno fue Edward Butler, cuya «bicicleta de gasolina» fue diseñada en 1884, aunque no se construyó y probó hasta cuatro años después. Tenía un motor horizontal de dos cilindros que impulsaba una sola rueda trasera, la cual podía ser levantada enteramente del suelo en el momento de arrancar mediante un pedal. El uso que hizo Butler del encendido eléctrico parecía prometedor, pero abandonó sus experimentos a causa de las restricciones de la Ley del Banderín Rojo, que efectivamente fue un obstáculo para los inventores británicos hasta su derogación en 1896. Otro vehículo precursor fue uno construido en Dinamarca en 1886; se conducía con un volante en vez de con una palanca de mano, tenía un embrague de cono de fricción forrado de cuero para la transmisión a cada una de las ruedas traseras, por lo que podía producirse algún deslizamiento en las curvas (problema finalmente resuelto por el engranaje diferencial del puente trasero), y estaba preparado tanto para privar de movimiento al eje de levas como para ir marcha atrás. Los franceses empezaron con motores Daimler construidos bajo licencia en París, pero desarrollaron rápidamente un diseño propio, iniciado en 1891 por Panhard y Levassor, que con modificaciones de detalle se hizo en seguida práctica normal de casi todos los otros fabricantes. El motor delantero de dos cilindros iba conectado a través de un embrague de fricción a una caja de cambios de tres velocidades, desde donde había una transmisión central por cadena al puente trasero, que incluía un engranaje diferencial.

Desde 1895 los diseñadores ingleses y americanos llegaron a ser cada vez más importantes. El primer Wolseley de tres ruedas fue diseñado por Herbert Austin mientras estaba empleado todavía en la Wolseley Sheep Shearing Machine Company. Tenía un motor compensado de dos cilindros, opuestos hori-

zontalmente, montado sobre una estructura tubular de acero; una cadena de rodillos unía la caja de cambios a la única rueda trasera; el motor de 2 cv estaba refrigerado por aire. Pero tecnológicamente es un tipo más notable el de F. W. Lanchester, que era ya un ingeniero distinguido antes de ponerse a diseñar un vehículo de motor. Fue el primero en estudiar el nuevo vehículo desde principios originales: los primeros diseñadores habían estado muy influidos por el diseño y la construcción de los carruajes de tracción animal: el nombre inicial de «coche sin caballo» indica esta preocupación por el pasado. Varias características que Lanchester introdujo en 1895-96 (fig. 192) se pueden hallar en todos los coches mo-

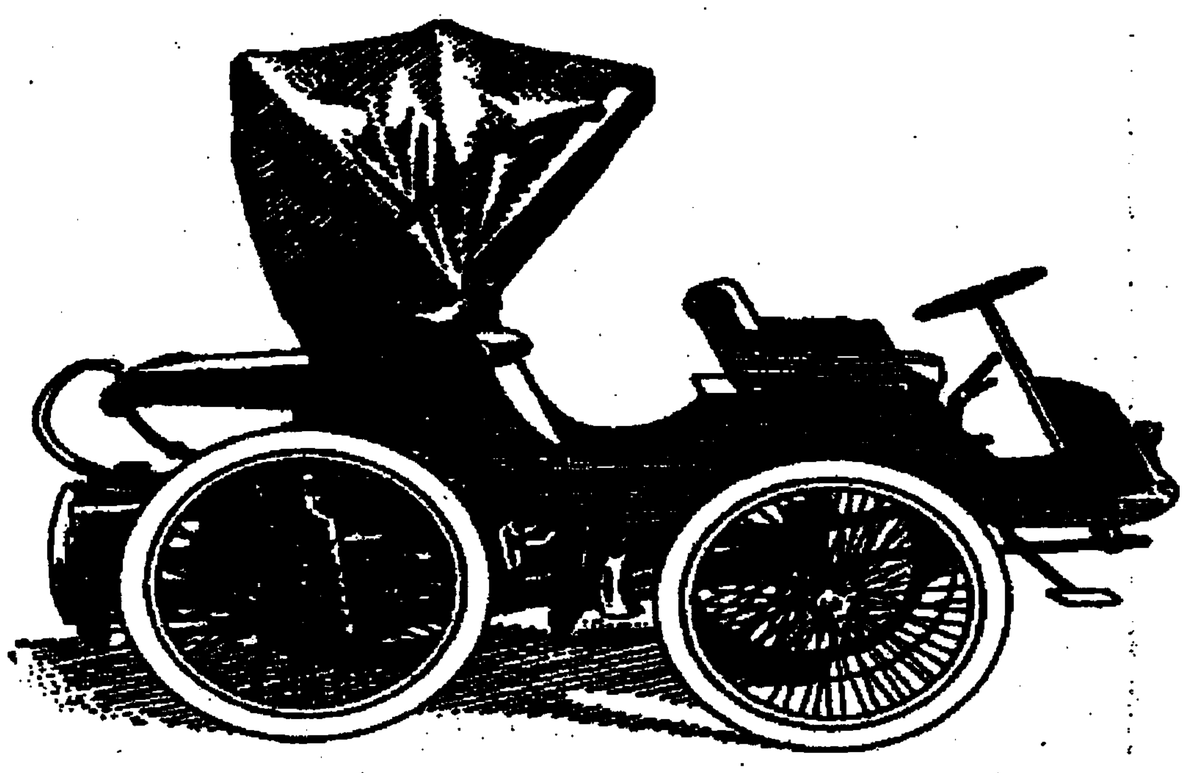


Fig. 192. Primer coche Lanchester (transformado para transmisión a las ruedas), 1896.

dernos. El motor monocilíndrico refrigerado por aire de su primer coche de 5 cv es descrito en otra parte de este libro (p. 890); tenía también una caja de cambios epicicloidal, que proporcionaba tanto la marcha corta como la marcha atrás y la directa; ruedas con radios de alambre tangencialmente dispuestos (ya en uso para las bicicletas), y neumáticos Dunlop.

En el nuevo siglo, sin embargo, en comparación con la Ford Motor Company, fundada en 1903, todas las otras compañías resultaron insignificantes por lo que se refiere a la extensión de las operaciones. Henry Ford puso ya en circulación su primer coche en 1896, habiéndolo tenido en estudio desde 1890. Este

coche tenía un motor de dos cilindros refrigerado por agua, colocado en la parte posterior, transmisión por correa, aunque se manejaba con una palanca de mano, y las ruedas con radios de alambre tenían cubiertas de caucho macizo; sin embargo, su velocidad máxima de 40 kilómetros por hora no era inferior a la de la mayoría de los modelos europeos de la misma fecha. Ford mejoró este coche en su segundo modelo, y en 1908 estaba en condiciones de lograr que el mundo se aficionara al automóvil gracias a la producción en serie de su modelo «T», que se vendió durante diecinueve años, sin mayores cambios de diseño, a un total de 15 millones de clientes.

Del mismo modo que el coche de turismo producido en serie, el camión pesado y el autobús interurbano constituyeron importantes manifestaciones de la tecnología del siglo XIX, cuya experimentación se dejó para el XX. Sin embargo, debe hacerse mención del desarrollo de la motocicleta, que fue objeto de la primera solicitud de patente de Daimler para su motor de gasolina de gran velocidad en 1885. El motor estaba montado verticalmente entre las ruedas, y la fuerza motriz se transmitía a la rueda trasera mediante una correa de cuero que se podía apretar o aflojar a voluntad por el motorista, pero no sabemos a ciencia cierta si las pruebas de esta máquina tuvieron éxito. Una segunda bicicleta de motor, con transmisión mediante cigüeñales y bielas, fue construida en Alemania en 1893, y desde 1895 se fabricó perfeccionada en Francia. Finalmente, los hermanos Werner, rusos establecidos en Francia, ensayaron la colocación de un pequeño motor en una bicicleta «de seguridad». Su primera patente fue la de un sistema de transmisión a la rueda delantera estando el motor colocado encima de la rueda, pero en 1900 llevaron de nuevo el motor a la posición equidistante entre las ruedas que Daimler había proyectado. Este fue el prototipo de la moto moderna, que saltó a la popularidad en los años inmediatamente anteriores a la primera guerra mundial.

INICIACION DE LA CONQUISTA DEL AIRE

Hemos visto cómo los nuevos inventos redujeron enormemente las dificultades del transporte de personas y mercancías por tierra y por mar. Durante el mismo período fue resuelto el problema de enviar mensajes con la introducción del telégrafo, del teléfono y de la telegrafía sin hilos (pp. 913-924), de manera que finalmente un mensaje podía dar la vuelta al mundo en cosa de segundos. Quedaba la conquista del aire. La historia principal de la máquina más ligera que el aire cae precisamente dentro de nuestro período, pues el primer *zeppelin*, que fue virtualmente el final de esta línea de evolución, fue lanzado en 1900. Pero la máquina más pesada que el aire con la que se inicia el futuro dependía del desarrollo del motor de combustión interna que suministrara una fuente energética suficientemente ligera y potente, no habiendo conseguido su primer vuelo con éxito hasta diciembre de 1903. Como su impacto sobre la humanidad es puramente un fenómeno del siglo xx, aquí sólo se pueden examinar unos pocos hilos de su historia primitiva.

El hombre siempre ha querido volar, como atestigua el mito de Dédalo e Icaro. El vuelo del pájaro ha simbolizado siempre para él un transporte libre de impedimentos por una ruta de sin igual derechura y aparente facilidad. Los chinos elevaron cometas, incluyendo posiblemente cometas portadoras de hombres, en el primer milenio a.C., mientras las investigaciones y especulaciones de Leonardo de Vinci acerca de los problemas del vuelo representan sólo la intensificación en el Renacimiento de un interés que se puede hacer remontar a través de la Edad Media hasta el mundo griego y romano. En el siglo XVIII Emanuel Swedenborg presentó un detallado diseño (fig. 193) de un ingenio volante de poco peso de tipo ornitóptero. Las alas, que habían de extenderse al batirlas hacia abajo y plegarse al batirlas hacia arri-

ba, funcionaban por medio de muelles controlados por el aviador, y la estabilidad se lograba con un peso suspendido debajo del centro de gravedad. Aun siendo interesante, no hay pruebas de que se hiciera ningún intento serio de poner en práctica el diseño de Swedenborg. Un jesuita del siglo XVII, Francesco de Lana-Terzi, fue el primero que pareció entender que la flotabilidad en el aire se rige por el mismo principio de Arquímedes que la flotación de objetos sólidos en líquidos. No obstante, las ascensiones en globo con éxito empezaron en Francia en la época de Lavoisier y los enciclopedistas. El hecho de que en las primeras ocasiones se empleara aire caliente

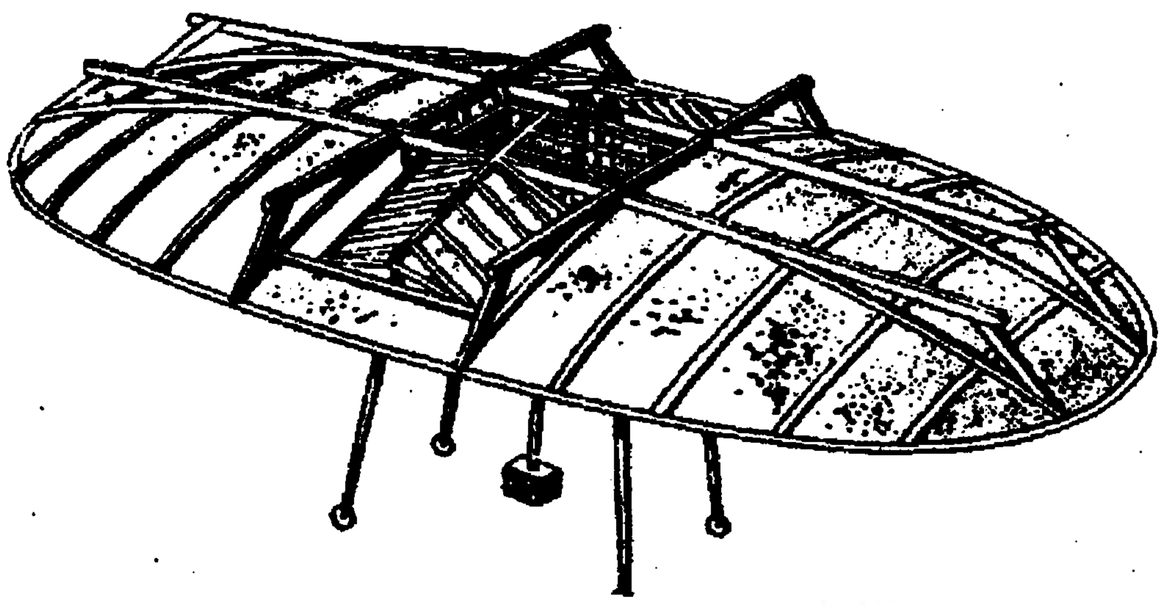


Fig. 193. Diseño de Swedenborg de un ingenio volante. Hacia 1716.

obedeció al desconocimiento de las propiedades del hidrógeno, descubiertas en 1776, que llevaron a la utilización de este gas para construir un ingenio elevable más eficaz. Los dos primeros vuelos con hidrógeno se hicieron desde París, a finales de noviembre y principios de diciembre de 1783 respectivamente, por dos parejas de intrépidos franceses, incluido en la segunda ocasión el famoso físico J. A. C. Charles, que había sugerido el uso del hidrógeno y que después continuó solo hasta alcanzar una altura de 2.700 metros.

Apenas había pasado un año cuando se realizó la primera travesía del canal de la Mancha (fig. 194). En el curso del siglo XIX los globos fueron usados en meteorología y para el estudio de la atmósfera superior a una altura de 7.500 metros; para ocasionales

Fig. 194. Primera travesía aérea del canal de la Mancha por Blanchard y Jefferies, 1785.

fotografías aéreas y transportes de emergencia (como durante el sitio de París en 1870); e incluso para un malogrado intento de alcanzar el Polo Norte (1897). Se utilizaron globos cautivos para observación militar ya en la batalla de Fleurus en 1794, por el ejército federal en la Guerra Civil americana (véase fig. 139) y por los ingleses en Africa del Sur, por

no hablar de propuestas imaginativas tales como una para su participación en una invasión napoleónica de Inglaterra (fig. 195). Pero el principal uso del globo se hizo en las ferias y fiestas —ya en 1810 se celebró la toma de posesión de un nuevo rector de la Universidad de Oxford con una ascensión en globo desde Merton Fields—, a menudo como espectáculo nocturno iluminado por fuegos artificiales o dramatizado por saltos en paracaídas: mientras el globo estuvo a merced del viento, su utilidad práctica fue limitada.

El problema de la propulsión era difícil, aun después de haber tomado la medida preliminar de dar forma alargada a la envoltura: el motor requerido, ligero pero potente, no estuvo disponible hasta el desarrollo del motor de gasolina. En 1852 el ingeniero francés Henri Giffard experimentó con una máquina

Fig. 195. Concepción imaginaria de una invasión francesa a Inglaterra por globo y túnel. Las fuerzas inglesas elevan cometas de un solo asiento a modo de defensa.

de vapor de 3 cv que movía una hélice tripala (figura 196); con ella consiguió la velocidad mínima para gobernar, pero poco más. En 1884 un globo equipado con un motor eléctrico de 9 cv, impelido por baterías especialmente ligeras, alcanzó una velocidad de 22,5 kilómetros por hora en un vuelo circular de unos ocho kilómetros, y al final mismo del siglo en Francia —donde se habían llevado a cabo estos experimentos— se estaban construyendo dirigibles grandes y pequeños, en los que lograron volar con considera-

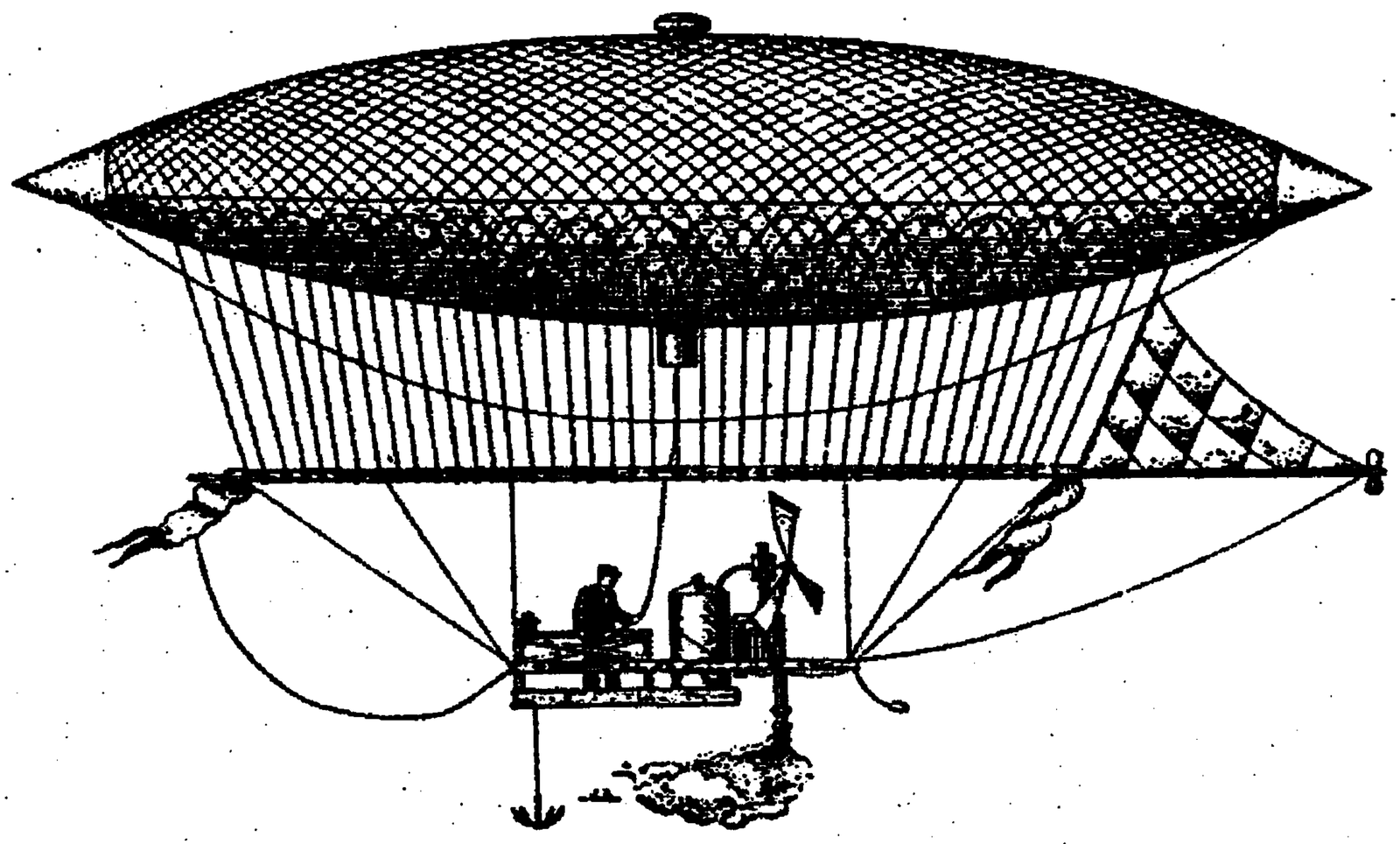


Fig. 196. Dirigible, de Giffard, propulsado por vapor, 1852.

ble éxito algunos aviadores, especialmente el brasileño Santos-Dumont. Todos ellos eran dirigibles de presión o deformables, en los que el gas mantenía la forma de la envoltura.

Los alemanes adoptaron el plan alternativo de construir un dirigible rígido, cuya estructura aerodinámica encerraba una serie de balones para gas independientes; la barquilla, donde iban el motor y la tripulación, estaba suspendida debajo. Los dirigibles rígidos fueron construidos de dimensiones mucho mayores que los del tipo deformable, resultando un fracaso el primer intento de hacer volar uno en 1897. Pero fueron entusiásticamente promovidos por

el conde F. von Zeppelin, que lanzó en el verano de 1900 el primero de la larga serie a la que llegó a asociarse su nombre. Desempeñaron un papel tan espectacular —aunque considerablemente ineficaz— en los años iniciales de la primera guerra mundial que la virtual extinción del dirigible en los años 1930 difícilmente podía haber sido prevista en aquellas fechas. Un problema importante, nunca resuelto de forma satisfactoria, fue el de obtener con seguridad la necesaria elevación. El hidrógeno es con mucho el más ligero de los gases conocidos, pero mezclado con aire es violentamente explosivo, y ésta fue la causa de muchos desastres. El helio, descubierto en 1895, pero no disponible comercialmente hasta mucho más tarde, y por entonces sólo en cantidades limitadas, es inerte por completo, pero tiene solamente un cuarto de la fuerza ascensional del hidrógeno.

El aparente futuro de los dirigibles y la plausibilidad del intento de una imitación directa del vuelo del pájaro alejaron a muchos inventores del correcto enfoque del problema del vuelo, al que se llega a través de la cometa y el planeador. El padre de la moderna navegación aérea fue Sir George Cayley, que no sólo vio, como pocos precursores, que las alas fijas eran esenciales, sino que en 1804 empezó una serie de experimentos de vuelo con modelos de planeadores desde las cimas de las colinas. Continuó sus pruebas durante casi medio siglo, en el curso de las cuales se cree que consiguió el éxito dos veces, al extremo de hacer volar un planeador durante corta distancia con un tripulante humano (fig. 197). Los experimentos con planeadores, dirigidos a asegurar la estabilidad y el control con una máquina de tamaño natural, continuaron después de la muerte de Cayley, y fue basándose en sus principios como consiguió finalmente el éxito el alemán Otto Lilienthal y su seguidor inglés P. S. Pilcher. En los años 1890 Lilienthal hizo más de mil planeos en su llamado «planeador de piloto suspendido» (fig. 198). Pilcher consiguió también realizar vuelos remolcados, pero

estos dos grandes inventores se mataron en accidentes de planeo en 1896 y 1899, respectivamente, así que es imposible decir lo que habrían podido conseguir con sus ideas de aplicar motores a sus planeadores, ideas sobre las que estuvieron trabajando en sus últimos años. Es muy posible que hubieran podido adelantarse al logro de los hermanos Wright, quienes también hicieron un estudio sistemático del planeo antes de intentar el vuelo con motor.

Fig. 197. Diseño hecho por Cayley de un planeador que lleva un hombre, 1799.

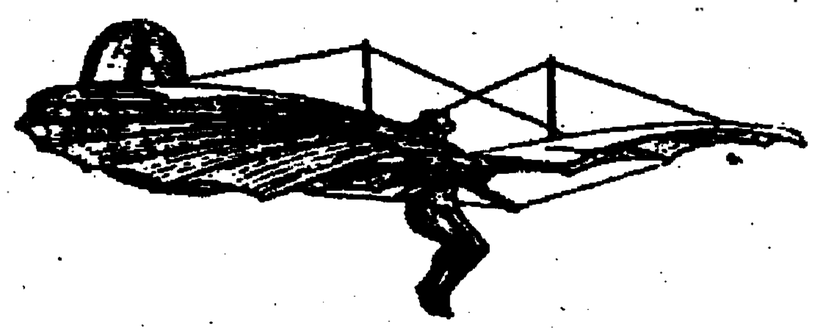


Fig. 198. Planeador de Lilienthal, 1895.

Mientras tanto, se habían realizado experimentos a partir de 1827 para perfeccionar una cometa monoplaza que levantaba a un hombre, tal como pudieran haber sido las grandes cometas elevadas por los antiguos chinos. Pero no se consiguió ningún resultado práctico hasta que L. Hargrave inventó en Australia, en 1893, la cometa de caja con superficies sustentadoras biplanas, más eficiente; este invento estaba influyendo en las ideas de Pilcher cuando se produjo su muerte. Entre otros inventores que se dieron cuenta de la significación de la cometa de caja se hallaba el ingeniero francés Octavio Chanute, uno de los iniciadores del planeo, que transmitió la noción de la estructura biplana atirantada a los hermanos Wright, y los animó también en otros sentidos.

Aunque el planeador fue de suprema importancia, sería erróneo ignorar otros progresos del siglo XIX que prepararon el camino para el logro final de los hermanos Wright. Por ejemplo, hubo un fabricante de encajes de Chard, John Stringfellow, que en el año de las revoluciones, 1848, logró hacer volar un aeromodelo de alas fijas con un alambre. Desde los años 1850 hubo aeromodelos que despegaron del suelo y volaron utilizando varias clases de fuerza motriz: goma elástica retorcida, mecanismo de relojería, vapor o aire comprimido. Los franceses fueron los más eminentes inventores en este campo, aunque Hargrave desempeñó también un papel considerable. Hubo incluso un diseño en forma de flecha que se intentó propulsar por un chorro de vapor; éste, como el invento del cohete Hale con aletas estabilizadoras para fines militares, se anticipó en casi cien años al más espectacular avance del hombre en aeronáutica de mediados del siglo XX. En 1896 la utilización de modelos culminó con la hazaña de un profesor americano de astronomía, S. P. Langley, cuyo monoplano movido por vapor, con una envergadura de casi cinco metros, voló 1.200 metros.

Sin embargo, el acontecimiento que verdaderamente marca el fin del siglo XIX ocurrió el 17 de diciembre de 1903. El biplano de hélice propulsora, sin cola, con un motor de gasolina de 12 cv, que el joven fabricante americano de bicicletas Orville Wright hizo volar aquel día, había sido construido en casa por él y su hermano Wilbur (fig. 199). El primer vuelo no cubrió más de 36,5 metros y duró 12 segundos, pero lo que había sido triunfalmente demostrada era la capacidad del hombre para trasladarse por el aire usando una maquinaria más pesada que el aire, con el adecuado control de la velocidad, la altura y la dirección. Sin embargo, la prensa americana ignoró totalmente el acontecimiento, y hasta 1908 no se adoptó en América y Europa el invento de los Wright, perfeccionado en los años sucesivos. Antes de esto, el aviador brasileño Alberto Santos-Dumont había

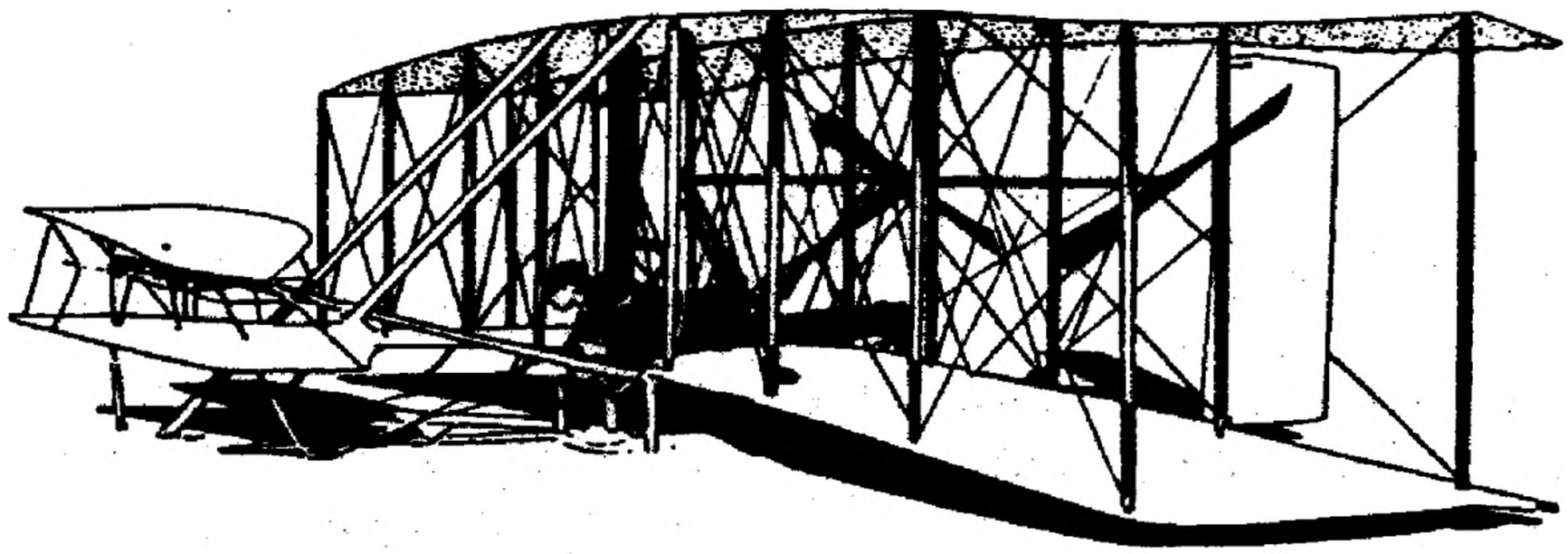


Fig. 199. El ingenio volante original de los hermanos Wright, 1903.

hecho el primer vuelo en Europa en un biplano concebido independientemente, pero inferior; los hermanos Voisin habían diseñado en su factoría francesa un biplano mejor, de cometa de caja, del cual ha evolucionado el moderno biplano de hélice tractora; y su socio Louis Blériot estaba diseñando por esas fechas el monoplano en que al año siguiente voló sobre el canal de la Mancha (fig. 200). La evolución técnica esencial estaba completada con ello, pues al desarrollarse la teoría de la aerodinámica —a la que

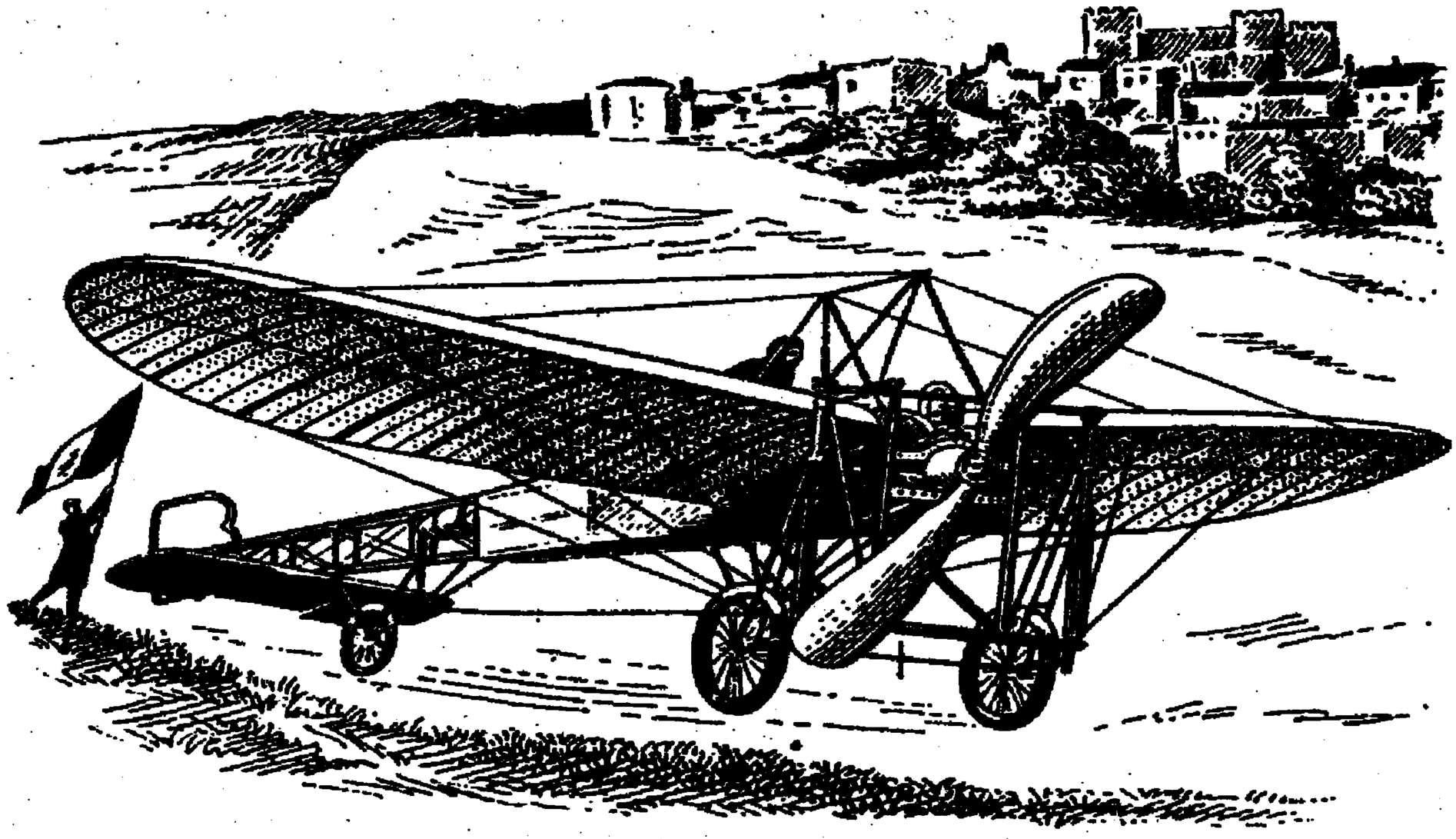


Fig. 200. Blériot aterrizando en Dover después de la primera travesía del canal de la Mancha, 1909.

el siglo XIX no hizo virtualmente ninguna contribución salvo la de Cayley— llegó a imponerse el diseño del monoplano. Era también el dramático comienzo de un nuevo período de la historia política, en el que el nuevo dominio del hombre sobre un tercer elemento intervino para complicar y quizá anular definitivamente las rivalidades existentes durante largo tiempo entre el poderío terrestre y el marítimo.

14. LA CONSTRUCCION: LAS NECESIDADES DE LAS COMUNIDADES URBANAS

EL INGENIERO CIVIL

El crecimiento de la población y los rápidos cambios industriales del período 1750-1900 exigieron una inmensa cantidad de construcciones en general. Parte de éstas, como las vías para las locomotoras de vapor, eran totalmente nuevas. Otros elementos, como los sistemas de abastecimiento de aguas y de desagües de las grandes ciudades, eran en gran parte nuevos, si no en principio, sí en su técnica y proporciones. Las viviendas, aunque mantuvieron intactas las formas tradicionales, utilizaron nuevos materiales y nuevas técnicas de producción en serie. Las múltiples nuevas necesidades de las modernas factorías, talleres y edificios de oficinas presentaban nuevos problemas de orden arquitectónico. Falta espacio, por tanto, para considerar el tema con algún detalle en función de los cambios de estilo arquitectónico o del desarrollo de la teoría de estructuras. En vez de ello, el tema, en este capítulo, se tratará principalmente desde el punto de vista de los materiales, que condicionaban toda la obra del ingeniero civil, y de dos ramas de la ingeniería, a saber: abastecimiento de aguas y desagües, que contribuyeron esencialmente al desarrollo de la vida urbana moderna. El capítulo siguiente describirá principalmente el amplio campo de la infraestructura requerida por el transporte moderno, aunque la división, hecha por conveniencia, está sujeta a excepciones.

La profesión de ingeniero civil surgió claramente al principio de este período; así como la ingeniería militar había sido separada de la civil en Francia en los días de Colbert y Vauban (p. 267), de igual forma el final del siglo XVIII presenció el establecimiento

de una clara distinción entre el ingeniero civil y el arquitecto. De nuevo llevó la delantera Francia, pues sus funcionarios públicos encargados de los puentes y las carreteras (p. 274) fueron los primeros ingenieros civiles reconocidos como tales. La Revolución francesa englobó su escuela por algún tiempo dentro de una organización más amplia, pero cuando recobró su existencia independiente, su posición quedó, en realidad, enormemente robustecida por la institución de la gran Escuela Politécnica, donde el ingeniero civil y otros profesionales recibían una formación preliminar antes de ser admitidos en las escuelas especiales. No es sorprendente por ello que Francia fuera también por delante en el campo de la literatura sobre ingeniería, tanto que el idioma francés era considerado esencial por especialistas en ingeniería aplicada, como Rennie y Telford, al tiempo que entre 1816 y 1823 fue profesor de ingeniería en la Academia Militar de los Estados Unidos, West Point, un veterano de las campañas napoleónicas. El primer director de la École des Ponts et Chaussées, J. R. Perronet, escribió sobre la construcción de puentes, a la vez que en la fecha tan moderna como 1930, 101 años después de su publicación, era reeditada *La science des ingénieurs* de B. F. de Belidor, con meras notas a pie de página registrando los progresos posteriores. En 1826 se publicó por C. L. M. H. Navier un libro de texto de teoría de la construcción para estudiantes franceses, ayuda de la que no dispusieron los estudiantes británicos hasta que Rankine llegó a ser profesor de ingeniería en la Universidad de Glasgow en 1855.

El desarrollo de la profesión de ingeniero en Inglaterra, aunque más lento, estuvo marcado por la formación en 1771 de una sociedad de ingenieros, más tarde conocida como el Smeatonian Club, y de la Institución de Ingenieros Civiles en 1818. Los Institutos de Mecánica que nacieron en las zonas industriales en la década de 1820 actuaron a un nivel mucho más humilde, tratando (por citar los fines

declarados en Manchester en 1827) de «enseñar al obrero aquellos principios científicos de los que depende su trabajo». Aun a este nivel, sus esfuerzos se frustraron en gran parte por la falta de la necesaria base de educación primaria; sin embargo, los institutos trataron ocasionalmente de sembrar las simientes de una curiosidad intelectual que pudiera dar lugar a ingenieros civiles autodidactos. Sólo con el establecimiento de la primera cátedra de ingeniería en la Universidad de Glasgow en 1840 y de la segunda en el University College de Londres en el año siguiente, el ingeniero británico, que había transformado entre tanto la faz del país, logró plenamente su pretensión de reconocimiento profesional. Las obras principales fueron encargadas cada vez más a arquitectos e ingenieros de carrera, aunque la mayoría de la edificación y de la construcción en pequeña escala de todas clases continuó siendo realizada en gran medida por pequeñas firmas, que empleaban métodos empíricos tradicionales.

LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION (1750-1850)

En el siglo XVIII la madera para la construcción llegó a ser escasa en las zonas costeras, debido a la demanda de los astilleros; en amplias zonas agrícolas, a causa del progreso de la roturación, e incluso en algunas zonas de bosque, donde resultaba más provechoso el monte bajo para hacer carbón vegetal que los árboles para madera. El uso generalizado de la piedra como material de construcción —circunstancia que todavía deleita los ojos del que visita los Cotswolds o Bath— llegó a estar igualmente restringido a las zonas en que era más fácil explotar una cantera, aunque su superior nobleza, y en la mayoría de los casos su superior durabilidad, hizo que siguiera prefiriéndose para edificios de excepcional lujo o importancia. Pero en general el primer efecto de la revolución industrial sobre la construcción fue

el de extender el uso del ladrillo. Los yacimientos de arcilla estaban mucho más difundidos que la piedra para cantería, mientras que el rápido desenvolvimiento de la minería del carbón y las mejoras en el transporte del mismo, primero por canal y después por ferrocarril, hicieron casi en todas partes más fácil la alimentación de los hornos para cocer ladrillos. El uso del ladrillo fue verdaderamente aún mayor de lo que parecía a simple vista, pues el arquitecto de la Regencia John Nash popularizó la práctica de cubrir el enladrillado inferior con estuco. Pintada y rayada, esta mezcla de cal y arena tenía un parecido superficial con la pared de piedra maciza. Del mismo modo, la sillería ornamental serrada, que habría sido costoso labrar a mano, se sustituía por arcilla, que había sido moldeada para darle forma antes de la cocción. Lo que era realmente terracota basada en el caolín (arcilla con la que se hacía la porcelana) estuvo muy de moda en Londres, bajo el nombre de piedra de Coade, desde 1769 hasta la desaparición de la firma que la producía, Coade y Seely de Lambeth, hacia 1840.

La mezcla del yeso para el acabado de paredes, del mortero para la unión de la piedra o el enladrillado, y del hormigón para los cimientos, experimentó una importante evolución como resultado de estudios que empezaron cuando John Smeaton estaba proyectando el tercer faro de Eddystone (p. 673) en 1759. Era bien conocido por entonces que la cal pura de mármol hacía el mejor yeso (lo que ocasionó un holocausto de la estatuaria antigua), que a la cal le podían ser conferidas cualidades hidráulicas añadiéndole *puzolana* italiana u otras sustancias. Pero Smeaton, por el análisis de la cal de todo el país, descubrió que esta cualidad hidráulica —esencial para la construcción del faro, que estaría parcialmente sumergido en cada marea— depende de la presencia de arcilla en la piedra caliza de la que se obtiene la cal. Se descubrió que la mejor mezcla natural se encontraba en la arcilla de Londres obtenida

en Harwich y Sheppey, y su uso se patentó en 1796 bajo el nombre de cemento romano, alusión a la durabilidad de las obras aún subsistentes procedentes de la ocupación romana en Inglaterra. En América fueron localizadas y explotadas materias primas naturales para el cemento a partir de 1818, como resultado directo de la construcción de canales, y usadas hasta los últimos años del siglo en mayores cantidades que las mezclas artificiales. Sin embargo, la teoría de la mixtura de cal y arcilla para formar cemento fue expuesta en 1839 por el francés L. J. Vicat, quien fabricó con éxito un cemento para el puerto de Cherburgo e introdujo el uso especial de la palabra «hidráulica» para esta cualidad esencial de endurecimiento e impermeabilización bajo el agua.

Mientras tanto, en Inglaterra se habían hecho con gran éxito mezclas empíricas de cemento. En el norte de Kent, donde la arcilla de Londres y el yeso de las North Downs se dan juntos, se llevaba por mar el carbón para los hornos de cal, en los que se producía un cemento satisfactorio, que era conducido a Londres y otros lugares de construcción. Northfleet, cerca de Gravesend, fue también uno de los primeros sitios donde se fabricó el llamado cemento Portland, aunque realmente fue inventado en Wakefield en 1824. Joseph Aspdin, albañil transformado en constructor, fue quien —no se sabe si por accidente o a propósito— calcinó una mezcla de yeso y arcilla a una temperatura bastante alta para aglutinarla, es decir, para que se unieran las partículas sin fundirse realmente. El nombre dado al producto representa la creencia optimista de Aspdin de que el hormigón hecho con él se aceptaría como sustituto de la piedra de Portland. Esto no era probable a causa de su color gris desvaído, pero su superior solidez y consistencia aseguraron su adopción para muchos fines. El hormigón de cemento Portland fue usado por M. I. Brunel en 1828 para rellenar el cauce del río sobre su túnel del Támesis (p. 667), y llegó a utilizarse en gran escala una generación después, cuando se

emplearon 70.000 toneladas para hacer la red de alcantarillado de Londres.

Aunque el uso del hormigón armado es posterior, el siglo XVIII había conocido un uso creciente del hierro forjado para reforzar la madera y la mampostería. Por este tiempo la madera que se usaba para los techos, las ventanas de guillotina y las puertas era de coníferas importadas, en vez de la madera dura desbastada con hacha que se usó en la Edad Media, y la colocación de los techos se había mejorado sustancialmente por el uso de vigas de celosía sistemáticamente diseñadas, tales como las que había empleado Wren. Un ejemplo interesante de la economía de madera resultante de un mejor diseño lo suministra la reconstrucción del tejado de la iglesia de San Pablo, en Covent Garden, después de haber sido destruida por el fuego la estructura originaria que proyectó Iñigo Jones bajo el reinado de Carlos I: cuando fue reconstruida a la misma escala en 1796 la proporción de madera del tejado se redujo a casi exactamente un tercio de la empleada en la construcción original. La utilidad de la viga de madera se aumentaba frecuentemente con la introducción de tirantes forjados y un mejor empernado. Pero a los constructores ingleses les disuadía del empleo del hierro en la mampostería el hecho de que las juntas de ésta dejan entrar la humedad que enmohece al hierro; el aumento de volumen de la herrumbre, comparado con el del metal original, agrietaba la estructura. En Francia, sin embargo, el hierro forjado fue usado de forma más ambiciosa por arquitectos tales como J. G. Soufflot, tanto para estructuras de tejados como en forma de refuerzo incorporado a la mampostería. En el caso bien conocido de la reconstrucción de la iglesia de París que más tarde llegó a ser el Panteón, Soufflot reforzó la mampostería con barras de hierro en aquellas partes que podía esperarse que se agrietaran bajo la presión de la cúpula. Las graves grietas que aparecieron en seguida condujeron a una prolongada

controversia —pues los proyectos de Soufflot habían escandalizado ya a los arquitectos convencionales—, pero resultó que se debían sólo a defectos del trabajo de los albañiles, y no al hecho de haber colocado hierro, aunque éste no estaba totalmente protegido de la corrosión.

El hierro colado, que había sido empleado en la construcción de puentes ya en 1779 (p. 656), iba sustituyendo cada vez más a la mampostería. Aunque comparte con el hierro forjado el defecto de que el calor intenso, incapaz de destruirlo, puede hacer que se desplome, podía considerarse como incombustible en comparación con los materiales para estructuras existentes. Por ejemplo, los edificios de varios pisos para fábricas de hilados, que estaban brotando en el norte de Inglaterra al terminar el siglo, tenían sólidos suelos de tablas sostenidos por pesadas vigas de madera; éstas, además, si la distancia de pared a pared era demasiado grande, se apoyaban en hileras intermedias de postes de madera. El peligro de incendio era muy grande, pues los materiales textiles, además, eran fácilmente inflamables; se trabajaba mucho por la noche con luces sin protección; y no se podía esperar que fueran sobrehumanamente cuidadosos seres humanos a los que se hacía trabajar con exceso. Las primas por el seguro de incendios para tales edificios eran en consecuencia altas, existiendo, por tanto, un fuerte incentivo para descubrir métodos de construcción a prueba de incendio. William Strutt, propietario de una fábrica de tejidos e interesado personalmente por este problema, usó piezas huecas de loza recibidas con yeso, que habían sido utilizadas antes en París para proteger del calor las vigas de hierro. Introdujo también arcos de ladrillo que abarcaban el espacio entre las vigas, sosteniendo éstas finalmente los suelos embaldosados de piedra. Pero el gran cambio lo constituyó el uso mucho más extendido del hierro colado, primero para las columnas de sostén, después para reemplazar a las vigas de madera y finalmente incluso en

los marcos de las ventanas. No sólo llegó a ser ésta la práctica corriente en los edificios fabriles, sino que en la primera mitad del siglo XIX con frecuencia se construyeron también tiendas y oficinas de un modo similar. Tal como lo desarrolló James Bogardus en edificios para oficinas de Nueva York (fig. 201), el uso de la estructura de hierro colado, que a veces alcanzaba una altura de más de 20 m, prefiguraba el tipo moderno de estructura en el que las paredes no soportan ninguna porción del peso.

El hierro colado, como muestra la historia primitiva de los guardafuegos de las chimeneas, se presta fácilmente a la reproducción de adornos. Este hecho fue aprovechado por un fundidor de Merseyside llamado John Cragg, hombre emprendedor, que con la cooperación del arquitecto Thomas Redman —un

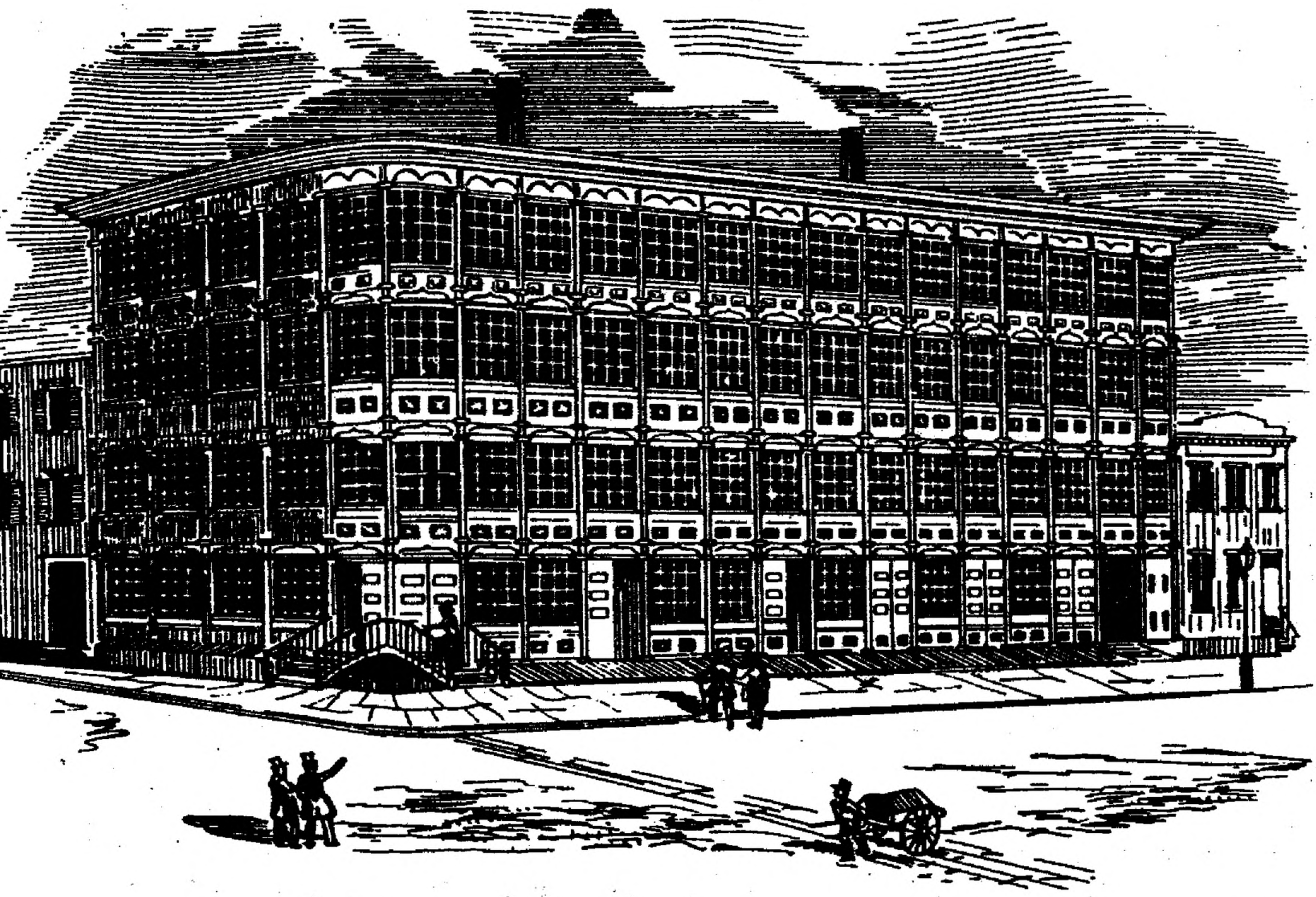


Fig. 201. Edificio con estructura de hierro colado, Nueva York, 1851.

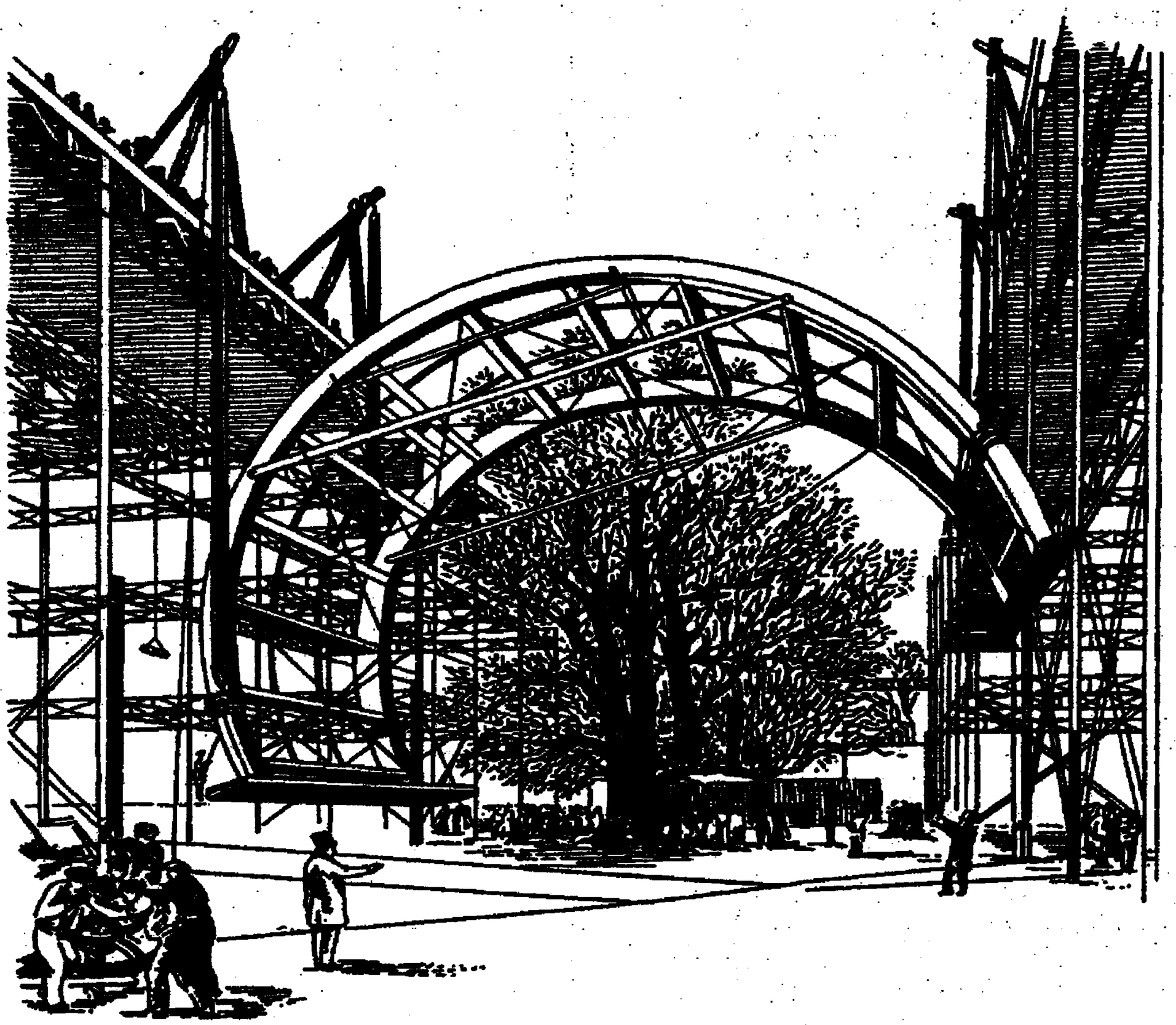


Fig. 202. Levantamiento de los primeros nervios del tejado del crucero del Palacio de Cristal, 1850.

arquitecto del estilo gótico que después se arrepintió del experimento— dotó a Liverpool en cinco años de tres iglesias en las que cada uno de sus elementos, incluidos los maineles de las ventanas y la tracería, eran de hierro colado; los tejados y las paredes de losas de pizarra sostenidas entre piezas de hierro fundido no podían mitigar el mal efecto. Estos herrajes góticos llegaron felizmente a popularizarse entre los constructores de iglesias, aunque el hierro colado proporcionó el material para la gigantesca aguja de celosía de la catedral de Ruán; sin embargo, el detalle ornamental se convirtió en una característica de las columnas de hierro colado, e incluso se aplicó al armazón de las máquinas de vapor y de la maquinaria industrial. El uso del hierro colado como material

estructural de importantes edificios alcanzó su culminación en Londres en el Parlamento, al que proporcionó el principal material para el tejado, y en el Palacio de Cristal de Joseph Paxton (fig. 202), en el que la velocidad y sencillez de su erección, que hicieron época, dependieron principalmente del uso de unas 3.500 toneladas de vigas normalizadas de hierro colado, cuyo tamaño y resistencia se comprobaban en menos de cuatro minutos por pieza cuando llegaban al solar procedentes de las tres firmas de fundición de hierro que compartían el colosal contrato. En París el equivalente de la obra de Paxton fue una de las primeras edificaciones que hizo Haussmann para Napoleón III, a saber: las Halles Centrales o mercado al por mayor, que Haussmann reconstruyó en cristal y hierro de acuerdo con la prescripción del Emperador de hacerlo en forma de «inmensas sombrillas» (fig. 203). Pero aunque el Palacio de Cristal es un ejemplo que influyó en una extensa y continuada práctica en la que el hierro forjado y el colado se usaron juntos en el mismo edi-

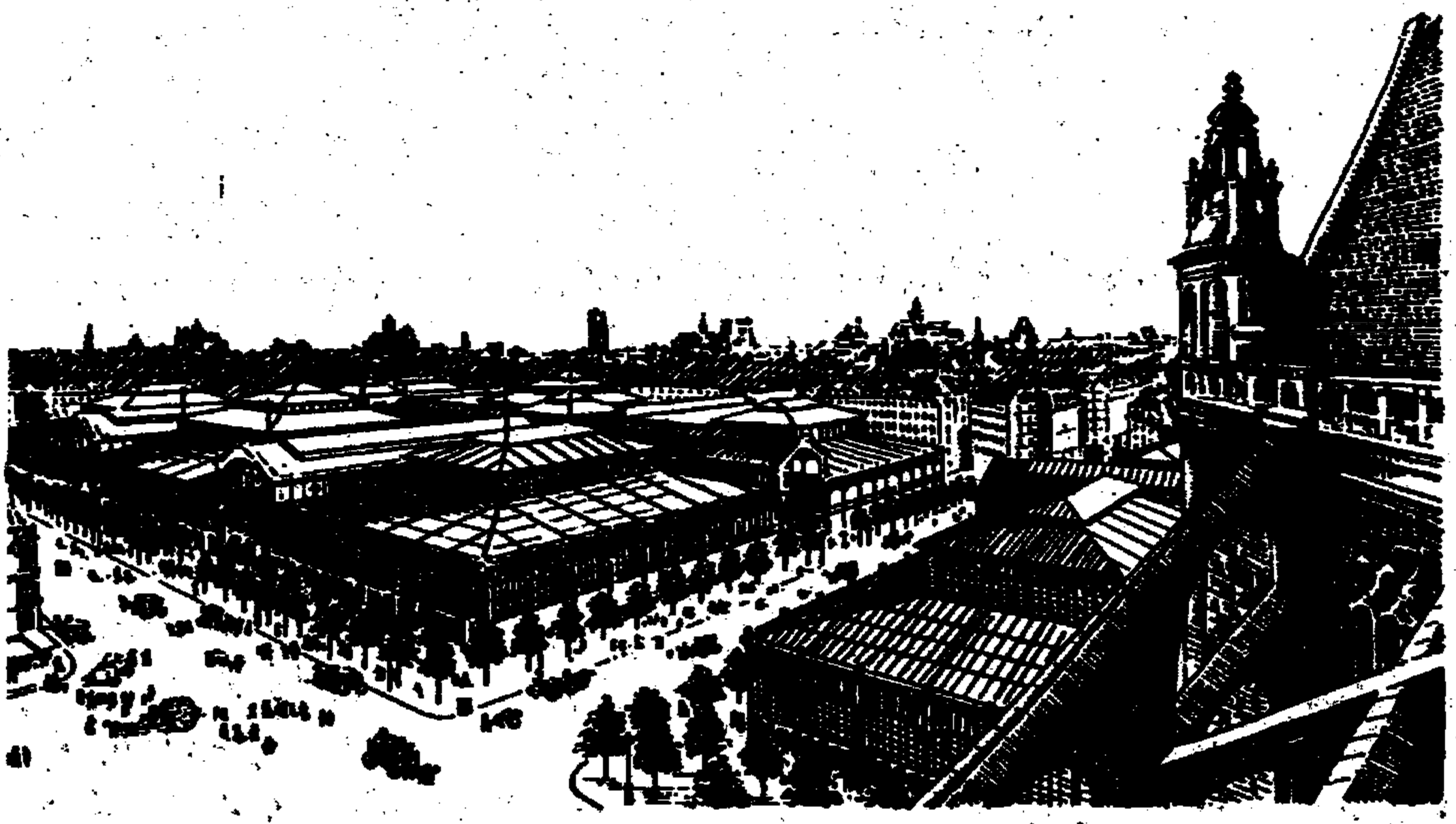


Fig. 203. Las Halles Centrales, París, 1860.

ficio, el año 1851 marca aproximadamente la transición a una época de nuevos materiales de construcción de los que el hierro forjado constituye uno más: Paxton usó el hierro forjado solamente para piezas sometidas a tensión.

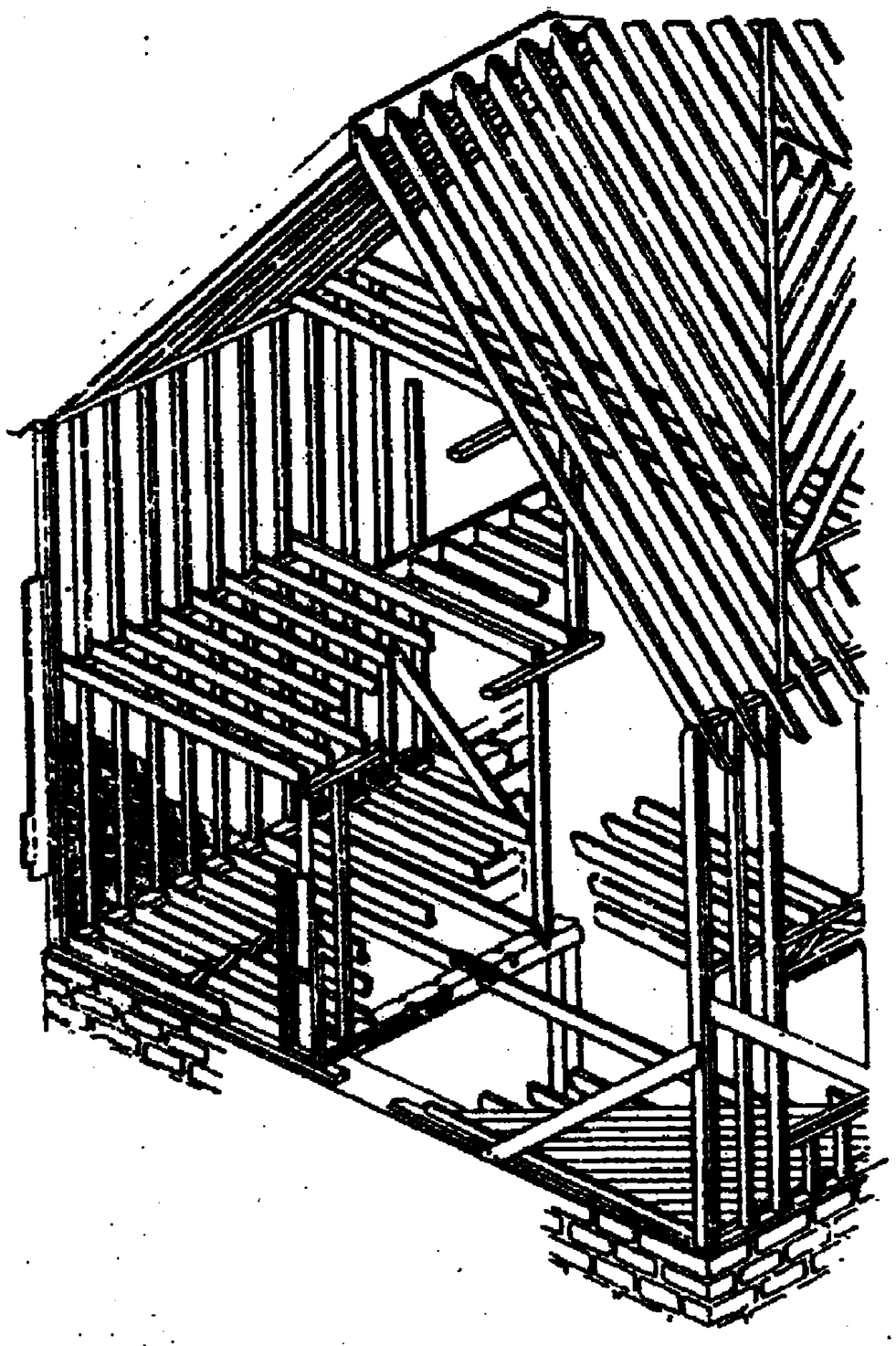


Fig. 204. Casa de tipo *balloon frame*, construida en Chicago en la década de 1830.

Entre tanto, el comienzo del siglo XIX había traído consigo algunos cambios en la utilización de la madera. En los nuevos poblados americanos, donde la madera era abundante pero los carpinteros escasos, se produjo en la década de 1830 una nueva demanda de casas levantadas aprisa. El resultado fue un tipo de construcción de casas aplicado por vez primera en Chicago, que por el tiempo del gran incendio de 1871 se había convertido en una ciudad de 300.000 habitantes, con los dos tercios de sus edificios de madera. Este tipo de casa fue apodado *balloon frame* [armazón de globo] (fig. 204) por sus críticos, porque prescindía completamente del pesado armazón

de madera. En vez de ello, el tejado y el suelo se sostenían por piezas de madera de igual longitud conocidas como pies derechos, que se ponían a unos 40 cm de distancia; se clavaban transversalmente tres soleras superiores de madera, sosteniendo los dos suelos y los cabrios del tejado; y todos los maderos restantes, numerados en el taller para facilitar el montaje a los aficionados, se unían por clavazón, suministrándose un saco de clavos hechos a máquina al aspirante a constructor de su propia casa junto con toda la tablazón para techos y las puertas y ventanas normalizadas.

Mientras este tipo de estructura estaba iniciando su larga carrera práctica en los poblados en rápido crecimiento de los pioneros americanos, en Inglaterra la madera conoció un nuevo auge más temporal en la construcción de las primitivas estaciones ferroviarias; éstas requerían un tejado de considerable luz para cubrir no sólo los andenes de viajeros, como actualmente, sino las locomotoras que no estaban en uso, y en algunos casos también los vagones de mercancías. La primera estación de Liverpool en Crown Hill tenía una luz de sólo 10,5 m; pero en diez años I. K. Brunel dotó a la estación de Temple Meads, en bristol de una cubierta en apariencia gótica, con una luz de 1,2 m más que la de Westminster Hall, aunque se empleó realmente el arco ojival atirantado. La culminación de la construcción en madera en este campo, sin embargo, la constituyó la realización de las dos bóvedas de medio punto de la estación de King's Cross, Londres, construida en 1852, que durante diecisiete años se sustentaron en arcos semicirculares con una luz de 32 m; los soportes de los arcos eran de hierro colado, descansando sobre machones de ladrillo. Se comprobó que la madera resistía bien el humo, pero como tendía a retener la humedad del vapor, se corroían rápidamente las clavazones de hierro. Por ello, finalmente, otros ferrocarriles siguieron la práctica de construir los tejados

totalmente de hierro, práctica que había sido utilizada por el ferrocarril Londres-Birmingham desde el principio.

Los muebles

Puesto que la madera continuó siendo por largo tiempo el principal material empleado en el amueblamiento de toda clase de edificios —salas de espera de estaciones y oficinas comerciales, así como interiores domésticos—, podemos interpolar aquí una breve referencia a los cambios en la índole y modo de construcción del mobiliario. A principios del siglo XVIII la introducción en Europa de la caoba curada procedente de Santo Domingo y las Bahamas, tan dura que sólo podía ser trabajada con herramientas de acero de la mejor calidad, condujo a las notables realizaciones en tallas de estilo rococó de los *ébénistes* franceses y sus más modestas copias inglesas. La ebanistería fina llegó por último a distinguirse claramente de la mejor carpintería de interior: *The Gentleman and Cabinet Maker Director* («La guía del caballero y del ebanista»), publicado por Thomas Chippendale en 1754, fue el primer libro inglés de su clase, Hepplewhite y Sheraton, cuyas *Guide* («Guía») y *Drawing Book* («Cuaderno de dibujo») aparecieron, respectivamente, en 1788 y 1791, son los más famosos de los numerosos ebanistas y diseñadores que escribieron sobre su aplicación comercial. En el caso de las sillas, por ejemplo, en que Hepplewhite popularizó la variedad con respaldo en forma de escudo y la variedad con brazos, el diseño del siglo XVIII no ha sido nunca superado. Pero el gusto que servían estos grandes diseñadores era el de una clase alta muy limitada, gusto formado —si tomamos como ejemplo el «milord» inglés— por el Gran Viaje emprendido en la juventud o por la consulta de un arquitecto muy viajero y caro como Robert Adam. A un nivel social más bajo, los mue-

bles continuaron siendo escasos y sencillos, de estilo tradicional y origen local, excepto donde una especial disponibilidad de material fomentaba la fabricación para un mercado más amplio: en este período surgió la silla Windsor, procedente de los bosques de hayas de Chiltern, con su asiento modelado con un molde de arcilla, y su simple respaldo de barrotes inclinados hacia atrás para mayor comodidad.

La Revolución francesa llegó cuando el mueble Luis XVI estaba dando a Europa una elegante orientación hacia formas clásicas, más sencillas, pero en las décadas siguientes el prestigio de Napoleón llevó su estilo imperio, con sus imitaciones tanto de Egipto como de Grecia y Roma, a través de toda Europa, y aun del Canal, donde influyó en el diseño Regencia. A un nivel más humilde podemos notar que la madera contrachapada, hecha encolando chapas sucesivas en ángulo recto, se popularizó en Inglaterra gracias al trabajo de los prisioneros de guerra franceses. Pero el efecto más importante de la Revolución francesa fue la conmoción que en todas partes produjo sobre las distinciones seculares de rango, de modo que la calidad y cantidad de los muebles se valoraron cada vez más como un símbolo visible de elevación social, que ahora podía alcanzarse simplemente con dinero. El resultado se vio más claramente en Inglaterra cuando el estilo Regencia dio paso al primer estilo victoriano, pues la influencia dominante era la de una clase media que aumentaba rápidamente en riqueza, número y confianza en sí misma, hogareña y muy preocupada por la apariencia y el cuidado de su casa, y deseosa de llevar a su medio familiar el sentido del valor del dinero y el productivo *know-how*, que sirvió de forma tan eficaz los intereses comerciales británicos. El resultado fue la clase de muebles exhibidos en la Exposición de 1851, que se supone habitualmente que representan el nadir del gusto británico.

La ejecución era usualmente buena, ya que la solidez de construcción proporcionaba un estímulo mo-

ral: la caoba era todavía una de las maderas favoritas; y la disponibilidad de muelles para los muebles (patentados en Inglaterra en 1826) y una rica variedad de tejidos fomentaban el arte del tapicero. Pero ésta fue también la edad de oro de las sillas y camas lacadas de cartón piedra, mostradas tanto por los expositores franceses y alemanes como por los británicos, siendo trabajado el material en finas capas «estufando» sucesivas hojas de papel que eran inmediatamente barnizadas y embutidas al modo japonés. El mueble ornamental era admirado en proporción a su elaboración, variando desde el *chiffonier*, con tallas naturalistas en cada superficie visible, a la poco frecuente mesa enriquecida con tales maravillas de habilidad como el cuadro de taracea que en algún caso llegaba a contener 110.000 piezas de madera. La talla a máquina (p. 517), además, había llegado exactamente a tiempo para satisfacer una enorme demanda de intrincadas reproducciones de obras medievales y del Renacimiento.

En el medio siglo siguiente el mobiliario, en general, se hizo menos pesado y complejo, aunque la influencia de William Morris, que intentó restaurar la artesanía de la Edad Media, y de innovadores más prácticos, como (Sir) Ambrose Heal, afectó sólo a una parte muy pequeña de la producción total; también fue limitada la moda en Europa de los muebles con patente americana, tales como la silla graduable y el equipo del coche-cama ferroviario. Pero el desarrollo de la maquinaria de carpintería, que desde sus humildes comienzos en los astilleros (p. 512) avanzó hasta poder imitar cada uno de los procesos normales de la fabricación manual de muebles, transformó entonces los métodos de esta industria, aunque no sus productos finales. Al mismo tiempo contribuyó a la economía de la fabricación en gran escala el crecimiento de las comunidades urbanas, de los transportes y de las artes publicitarias, que enseñaron al consumidor un modo de vivir agradable, con juegos de muebles por habitaciones. Medida en

ventas, la industria del mueble americana en 1900 era siete veces superior a la de medio siglo antes, y desde la década de 1870 la mayoría de sus productos se hacían en fábricas. Donde la mano de obra era más barata que en los Estados Unidos, el trabajo manual no fue tan fácilmente desterrado: dentro de lo que podemos recordar los que aún vivimos, los artesanos aislados de las colinas de Chiltern usaban todavía el torno de pértiga (p. 151) para tornear las patas de las sillas. A la larga, sin embargo, Europa sucumbió igualmente a la moda de los tipos normalizados, construidos de forma no muy esmerada, feos a menudo, y a veces —como cuando la clase de madera está desfigurada con pintura simulando las vetas naturales de otras mejores— falsificados. Pero la pérdida social que implicó la decadencia de una industria selecta quedó contrarrestada con la ganancia social que supuso la mayor disponibilidad de muebles para las masas. La armadura metálica de las camas, exhibida en 1851 y producida comercialmente poco después, es un ejemplo de la manera como se introdujo en los hogares de los pobres, a consecuencia de la producción en serie, un mayor nivel de comodidad e higiene: el hierro colado no albergaba parásitos, y si la cama se rompía era fácilmente reemplazada.

NUEVOS USOS DEL HIERRO FORJADO, DEL ACERO Y DEL HORMIGON

El uso creciente del hierro forjado, que en épocas anteriores había figurado principalmente como suplemento a la obra de madera o de hierro colado, fue un progreso importante de las décadas de 1850 y 1860. En 1847 un ingeniero de París hizo la primera viga de hierro forjado, muy pequeña, para utilizarla en los suelos, y antes de transcurrir diez años (Sir) William Fairbairn defendía su valor como material de construcción. Entre tanto, se había hecho posible,

gracias al invento del «laminador universal», la fabricación de vigas largas de gran perfil. Su uso fue, sin embargo, restringido durante muchos años por el hecho de que un pudelador sólo podía proporcionar un pequeño tocho cada vez, y una viga maciza sólo podía ser producida después de haber sido martillados juntos varios tochos para formar un lingote del tamaño debido. Por eso lo que se generalizó fue la construcción de grandes vigas remachando juntas planchas, vigas angulares en T y otros perfiles. Las cerchas de hierro forjado se comenzaron a usar en Londres para la estación de ferrocarril de Euston, en 1839, con una luz de 12 m, y culminaron con la de St. Pancras, de una luz seis veces mayor, pero siguió siendo muy rara la utilización de una estructura completa de hierro forjado para soportar las cargas. Uno de los mejores ejemplos tempranos es la fábrica de chocolate Menier (1871-72) en Noisiel-sur-Marne, que necesitó un armazón ligero, porque estaba construida sobre el río, apoyada en pilares de mampostería, de forma que pudiera utilizar la fuerza motriz, suministrada por ruedas hidráulicas. La construcción de la sala de lectura del Museo Británico (1854-57) es quizá más típica: para la cúpula de 30 m se combinaron nervios y vigas de hierro forjado con columnas de hierro colado hechas en tres secciones, que se atornillaban juntas; luego se cementaron los resquicios entre las piezas fundidas, que no quedaban muy ajustadas porque no estaban hechas a máquina, con un cemento especial que se supone inventó William Murdock para las armaduras primitivas de máquinas de vapor. El edificio más alto de todos los de hierro forjado data sólo de 1889, cuando la exposición conmemorativa del centenario de la Revolución francesa motivó la erección de la Torre Eiffel, de 300 m, con la intención de que se mantuviera durante cinco años, aunque es todavía el más sorprendente hito de París (fig. 205). En la superestructura, colocada sobre una base maciza de hormigón armado, se utilizaron 7.300 toneladas de hierro

forjado, elegido por Eiffel con preferencia al acero por su mayor rigidez. Como en el Palacio de Cristal, las 12.000 piezas principales de hierro fueron prefabricadas.

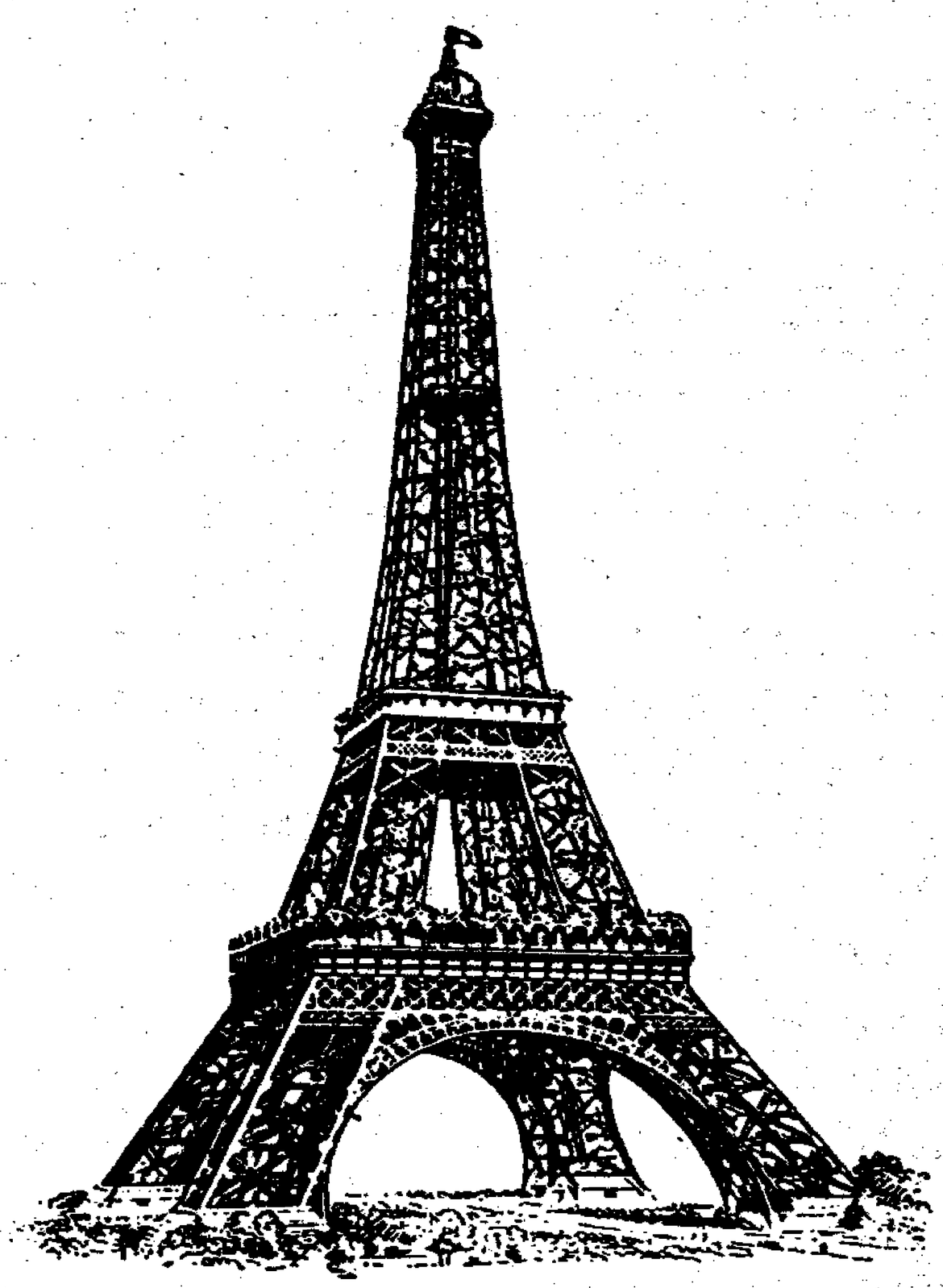


Fig. 205. La Torre Eiffel.

El empleo de acero barato como material de construcción se hizo posible gracias a los inventos de las décadas de 1850 y 1860, pero gran parte de la producción fue absorbida por los carriles, porque las vías de acero duraban mucho más que las de hierro (p. 555), mientras que para otros fines se prefería a menudo el hierro forjado, por ser más homogéneo y corriente: hasta 1887 la British Board of Trade no autorizó el uso del acero en la construcción de puentes. Los procedimientos Bessemer y Siemens permitieron disponer de grandes lingotes que podían ser laminados en la forma largo tiempo deseada de viga

en doble T, de perfil muy resistente. En 1882-89 se emplearon 50.000 toneladas de acero en la construcción del puente de Forth, llegando la fabricación y venta de vigas de acero laminado a quedar firmemente establecida en Inglaterra por Dorman Long y otras firmas.

Mientras tanto, sin embargo, América no sólo tomó la delantera en la producción de acero barato, sino que desarrolló su uso para un nuevo tipo de edificio: el acero engendró el rascacielos. El principal incentivo fue el rápido aumento de valor del suelo en las congestionadas zonas centrales de ciudades en auge, como Nueva York y Chicago. El camino había sido allanado por la moda de la «casa con ascensor», después que E. G. Otis eliminó en 1854 el peligro del ascensor hidráulico para personas dotando a la cabina de trinquetes, que unos resortes obligaban a engranar con muescas a los lados del pozo del ascensor en el momento que se rompía el cable (fig. 206). Ni estos edificios, ni los aún más altos que siguieron, habrían atraído una suficiente clientela de incansa-

Fig. 206. Elisha Otis haciendo una demostración de su ascensor de seguridad, 1854.

bles trepadores de escaleras a no ser por el ascensor. Al comienzo, el nuevo tipo de estructura tenía suelos de hierro forjado y fachadas de hierro colado —siendo prefabricadas las distintas partes—, pero cargados sobre muros de mampostería, que requerían un aumento de espesor en la base en proporción a la altura. Podían levantarse hasta catorce pisos, como en el caso del edificio Pulitzer, construido para el *New York World* en 1890, pero en la planta baja —donde el espacio se valoraba más— los muros tenían casi 3 m de espesor. Una estructura totalmente de acero no tenía tales limitaciones. Podían levantarse columnas de acero virtualmente de cualquier altura, asentadas sobre una base segura, sin ningún aumento de tamaño en la base. Unidas en cada piso por vigas de acero, sostenían todo el peso del edificio, de modo que la función de los muros se reducía a dar cobijo y aislamiento.

Se utilizaron vigas de acero en los pisos superiores de un bloque de oficinas con estructura de hierro construido en Chicago en 1884; la primera estructura completa de acero le siguió en 1890, también en Chicago, y su templo masónico de veintiún pisos construido en 1892, descrito como el mayor edificio del mundo y como una de sus siete maravillas, dio paso a una nueva era. La erección del primer rascacielos de Nueva York dos años después ilustró dos grandes dificultades de este tipo de edificios: los cimientos tenían que ser excavados a 15 m bajo tierra, utilizando cajones, luego rellenos de hormigón, y la estructura tenía que ser arriostrada con piezas de metal suplementarias, para resistir los vientos fuertes. A finales del siglo Nueva York había eclipsado a Chicago, con veintinueve rascacielos contra dieciséis y una altura máxima de 118 m frente a los 91,5 m de altura máxima de los de Chicago. Las ciudades de Europa no tenían tales siluetas. Inglaterra, durante la década de 1890, aplicó el acero solo, y aún escasamente, a la construcción industrial. Un almacén de muebles del West Hartlepool, construido en 1896, es

el primer ejemplo inglés de una estructura completa de acero; pero pasó más de otra década antes de que la Ley de Edificación de Londres reconociera que el espesor de las paredes exteriores podía ser reducido sin peligro cuando era posible insertarlas por partes en una estructura que soportara toda la carga.

En el mismo período se había desarrollado además otro material estructural de gran importancia al extenderse el uso del cemento Portland, que hasta la década de 1890, cuando América perfeccionó el horno giratorio para aglutinar la materia prima, fue una importante exportación inglesa tanto al Nuevo Mundo como al resto de Europa. Para toda clase de edificación su valor estaba limitado por el hecho de que, a diferencia del hormigón de cal, el hormigón hecho con cemento Portland empieza a fraguar tan rápidamente que sólo las obras muy grandes usaban cantidades suficientemente importantes como para justificar el empleo de una hormigonera movida por vapor. Para cimientos que dieran la adecuada resistencia a los edificios altos, el hormigón era inestimable, pero para otros usos en la edificación se advirtió que ni los muros de hormigón, vaciados *in situ* entre encofrados, ni los bloques de hormigón hechos en fábrica tenían gran aliciente. Lo que quedaba por explotar era el empotrado del hierro o acero en un hormigón tan completamente impermeable que no hubiera ningún peligro de corrosión: esto proporcionaría un material de construcción que combinaría la resistencia a la tracción del hierro con la virtual incomprensibilidad del hormigón.

El hormigón armado empezó bastante humildemente con la fabricación de cubas de hormigón para naranjos, en las que el francés Joseph Monier introdujo una malla de varillas de hierro. Esto sucedió en 1849; sólo cinco años más tarde W. B. Wilkinson, un constructor de Newcastle upon Tyne, patentó un sistema mucho más complejo para introducir varillas de hierro en techos de argamasa y

hormigón, y para reforzar las vigas de hormigón con cables de mina usados. Pero esta empresa no dio resultados duraderos, mientras que Monier obtuvo una serie de patentes, incluso una para vigas en 1877, y a partir de 1885 sus patentes fueron explotadas en Alemania con licencia. Wayss y Freitag, de Frankfurt del Main, realizaron un trabajo de introductores, encargando también el estudio de Mathias Koenen *Das System Monier*, que analizaba la teoría de la combinación de la resistencia a los esfuerzos de tracción y de compresión. Por otra parte, en la década de 1890, otros dos franceses realizaron una obra importante. Edmond Coignet —cuyo padre había obtenido una generación antes una patente para suelos de hormigón y había considerado, aunque no intentó diseñarlas, la mayoría de las formas que tomarían más tarde las estructuras de hormigón armado— probó en la construcción del alcantarillado de París que un armazón de 84,5 milímetros del nuevo material podía sostener sin peligro 4,5 metros de tierra. Su rival fue François Hennibique, que en el mismo año (1892) implantó en las vigas de hormigón armado un sistema de estribos verticales de fleje para resistir las deformaciones por ciralladura.

Pasaron cinco años antes de que el sistema de Hennibique fuera adoptado en Inglaterra, que en esta materia estaba bastante retrasada respecto al resto de Europa. Esto es notable porque no sólo fue Wilkinson quien hizo los primeros trabajos en esta materia, sino que también fue un inmigrante inglés en América, Thaddeus Hyatt, quien esbozó con éxito en 1877 la teoría del hormigón armado sobre la base de pruebas hechas por él en un laboratorio de Londres. Fue también un inglés, E. L. Ransome, enviado a San Francisco como agente de ventas por una fábrica siderúrgica de Ipswich, quien comenzó a embeber en hormigón las vigas de hierro para estructuras fabriles. Ransome levantó su primer edificio importante realizado con vigas de hormigón armado en 1888, y a final del siglo estaba desarrollando un

sistema de construcción normalizada incluyendo suelos basados en vigas de hormigón armado con espirales de alambre, de modo que las vigas se trabaran con una losa de hormigón armado vaciado en la obra. En la construcción de puentes con el nuevo material, sin embargo, la Europa continental dejó atrás a América, por no decir a Inglaterra. Cuando se inauguró en 1894 el primer puente de carretera de hormigón armado americano, con una luz de 9 metros, hacía casi veinte años que en Europa existían puentes de hormigón del tipo Monier, tres de ellos en Suiza, con una luz de 39 metros. Hennibique fue también constructor de puentes, habiendo completado en 1898 un arco de 52,5 metros que atravesaba el río Vienne en Châtellerault.

A la larga, el principal uso del hormigón armado, en forma de lámina o de pilar, fue para ayudar a construir edificios altos, hacia los que el general aumento del valor de los solares que acompaña a la urbanización hizo que se dirigiera el desarrollo tecnológico. Puede que convenga por ello mencionar brevemente que a finales del siglo XIX se habían abordado ya algunos de los principales problemas subsidiarios. El ascensor hidráulico había sido mejorado de tal forma que los tres sucesivos que hubo en la Torre Eiffel (uno de Otis, dos de construcción francesa) llevaban al visitante a la cúspide, en tres etapas, en siete minutos. Además, en 1889 el ascensor eléctrico, que era mucho más rápido, iba a ocupar su lugar. Existían también agudos problemas de prevención de incendios, que provenían principalmente del aumento de altura de los edificios, pero también del aumento del espacio que ocupaban las ventanas —las paredes sin hueco del pasado prevenían mucho mejor la propagación del fuego— y de la sustitución por secciones ligeras de acero o hierro forjado de las más macizas, y por eso menos vulnerables, de hierro colado.

Parte de la solución consistió en proteger los edificios altos instalando depósitos de agua a alturas

por encima de los 24-30 metros, máximo al que podían llegar las mangueras desde el suelo a las presiones normalmente disponibles. Al mismo tiempo se intensificó la investigación de sistemas de suelos resistentes al fuego. Con frecuencia se utilizaron sólidas losas de hormigón en posiciones claves, pero hacia 1875 se dispuso en América de bloques huecos de terracota hechos a máquina para instalaciones de suelos. En los diez años siguientes A. D. Gilman había producido en Iowa un bloque poroso, mezclando serrín con la arcilla antes de la cocción, que podía aserrarse en la forma deseada; este tipo se usó mucho en los edificios altos de la década de 1890. Otra práctica posterior fue la de proteger las vigas de acero rodeándolas de unos 8 centímetros de hormigón fuertemente sujeto con tela metálica: el calor intenso deshidrataría la capa exterior del hormigón, aumentando así sus propiedades aislantes.

MEJORAS DEL ABASTECIMIENTO DE AGUAS

La boca de incendios representa sólo un uso especial del continuo abastecimiento de aguas con el que los modernos habitantes de las ciudades esperan satisfacer sus necesidades de beber y lavarse, para muchos procesos industriales y para subvenir a la evacuación de las aguas residuales. De 1801 a 1851 la población de Inglaterra se duplicó casi exactamente, pero esto no da idea de toda la extensión del problema puesto que el crecimiento fue más rápido en las grandes ciudades. La población de Glasgow, por ejemplo, creció el doble del promedio nacional, y en una sola década su demanda de agua se duplicó aproximadamente.

En tales circunstancias los métodos del pasado posiblemente no bastaban. En Londres, por ejemplo, al final del siglo XVIII por lo menos tres de sus compañías se abastecían de agua del Támesis. La más antigua la obtenía con ruedas hidráulicas en el

Puente de Londres (fig. 207); la segunda, que había empleado en otro tiempo la «bomba de incendios» de Thomas Savery, extraía el agua cerca del Strand; y una tercera la traía del río en Chelsea para llenar dos depósitos en Green Park. Desde comienzos del siglo XVIII este suministro del Támesis había sido suplementado por el New River, un acueducto de 70 kilómetros que traía agua de algunos manantia-

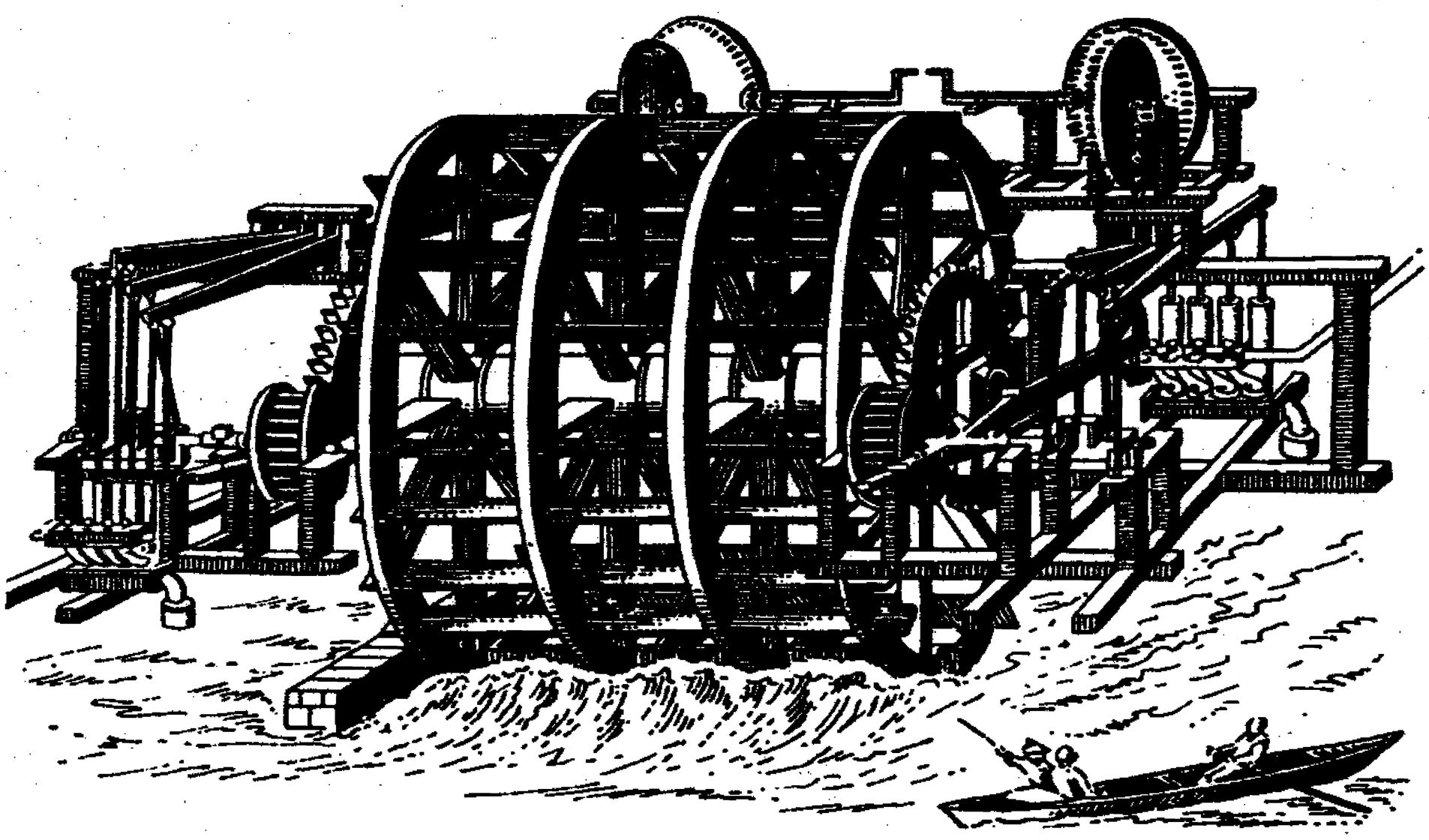


Fig. 207. Ruedas hidráulicas impulsando las bombas. Puente de Londres, 1749.

les de Hertfordshire y del río Lea. Una tercera fuente comprendía pozos (fig. 208), manantiales locales y profundas perforaciones para alcanzar los manantiales que corrían bajo la arcilla de Londres, métodos que resultaron cada vez más ineficaces a medida que Londres crecía, aunque de otra parte el progreso de la geología permitió obtener un mayor éxito en las perforaciones para sacar agua subterránea. Cuando en 1845 se abrió un pozo para proveer de agua a las fuentes de Trafalgar Square, el nivel del agua estaba a 34 metros de profundidad; en 1911 este nivel había descendido a 72 metros, y el pozo

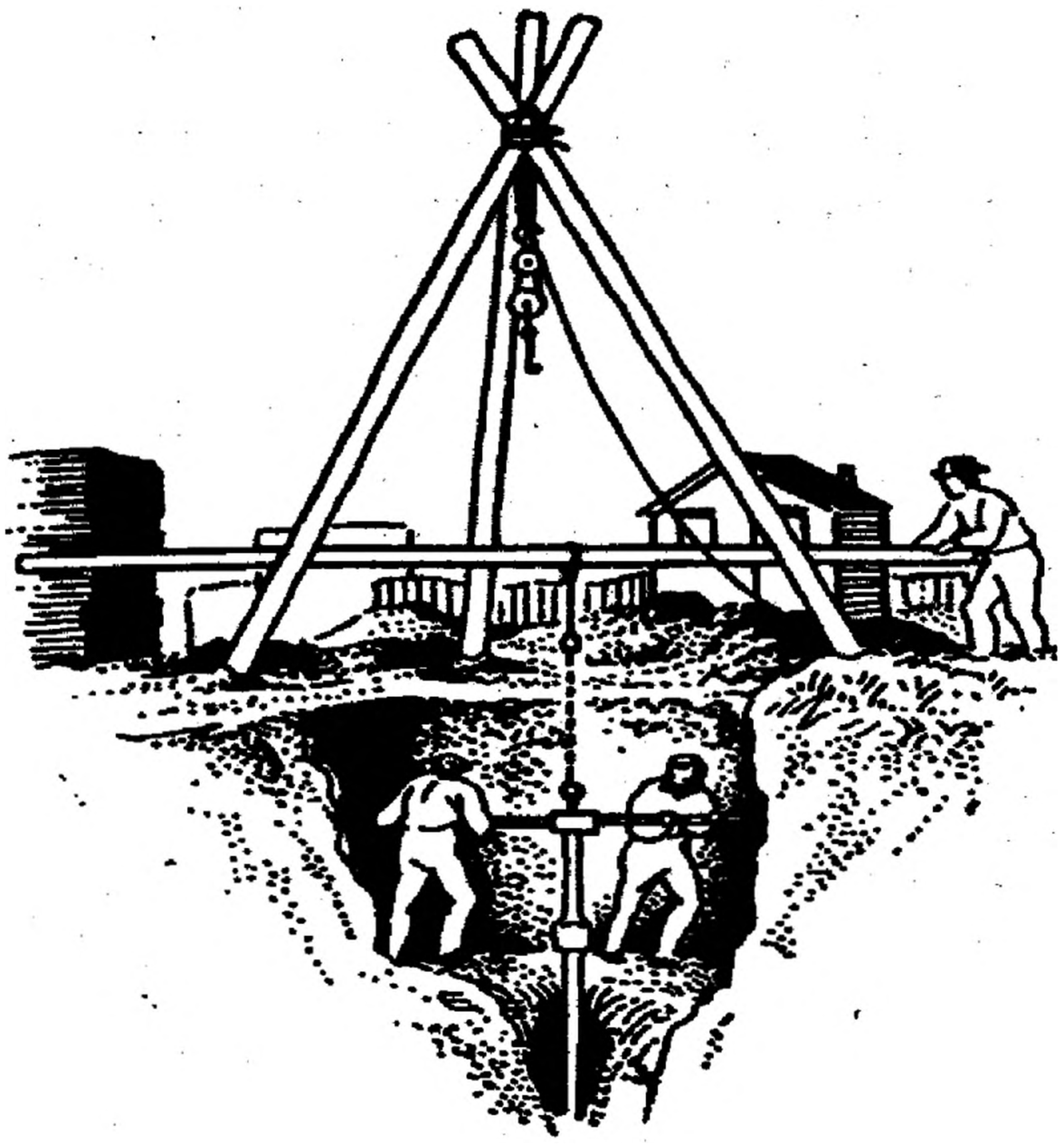


Fig. 208. Perforación de un pozo artesiano. Siglo XIX.

fue entonces abandonado. Es cierto que se abrieron nuevos pozos —por ejemplo, en la parte más baja de Hampstead Heath y en Kentish Town—, pero en la comarca de Londres no se tuvo el éxito que recompensó siete años de perforación en Grenelle, París (fig. 209), donde se encontró agua a una profundidad de 550 metros, obteniéndose un rendimiento de 3.500.000 litros al día y a una presión suficiente para elevarla a 33 metros sobre el nivel del suelo.

Por lo que se refiere a la distribución del agua, en los siglos XVII y XVIII eran habituales las cañerías de madera, especialmente de olmo, aunque en Francia se habían empezado a emplear tuberías de hierro colado para el abastecimiento de agua a Versalles en los tiempos de Luis XIV, y hacia 1750 se usaban también hasta cierto punto en Londres y Edimburgo. El suministro no llegaba necesariamente a cada casa y aun menos a sus diferentes partes, ni era continuo; los aguadores ambulantes eran todavía un espectáculo corriente en Londres, París y muchas otras grandes ciudades. Al comienzo del siglo XIX los habitantes de una calle de un barrio obrero se consideraban

bien servidos con una sola toma de agua donde ésta corría a períodos fijos —con frecuencia sólo una hora— cada día, aunque la clase acomodada podía normalmente contar con un suministro por cañerías a los pisos bajos de sus casas (fig. 210), desde donde los criados tenían que subirla.

El progreso en la primera mitad del siglo XIX se produjo como resultado directo de los grandes cambios industriales. Así, la «máquina de Cornualles» (p. 471) hizo posible bombear el agua a través de

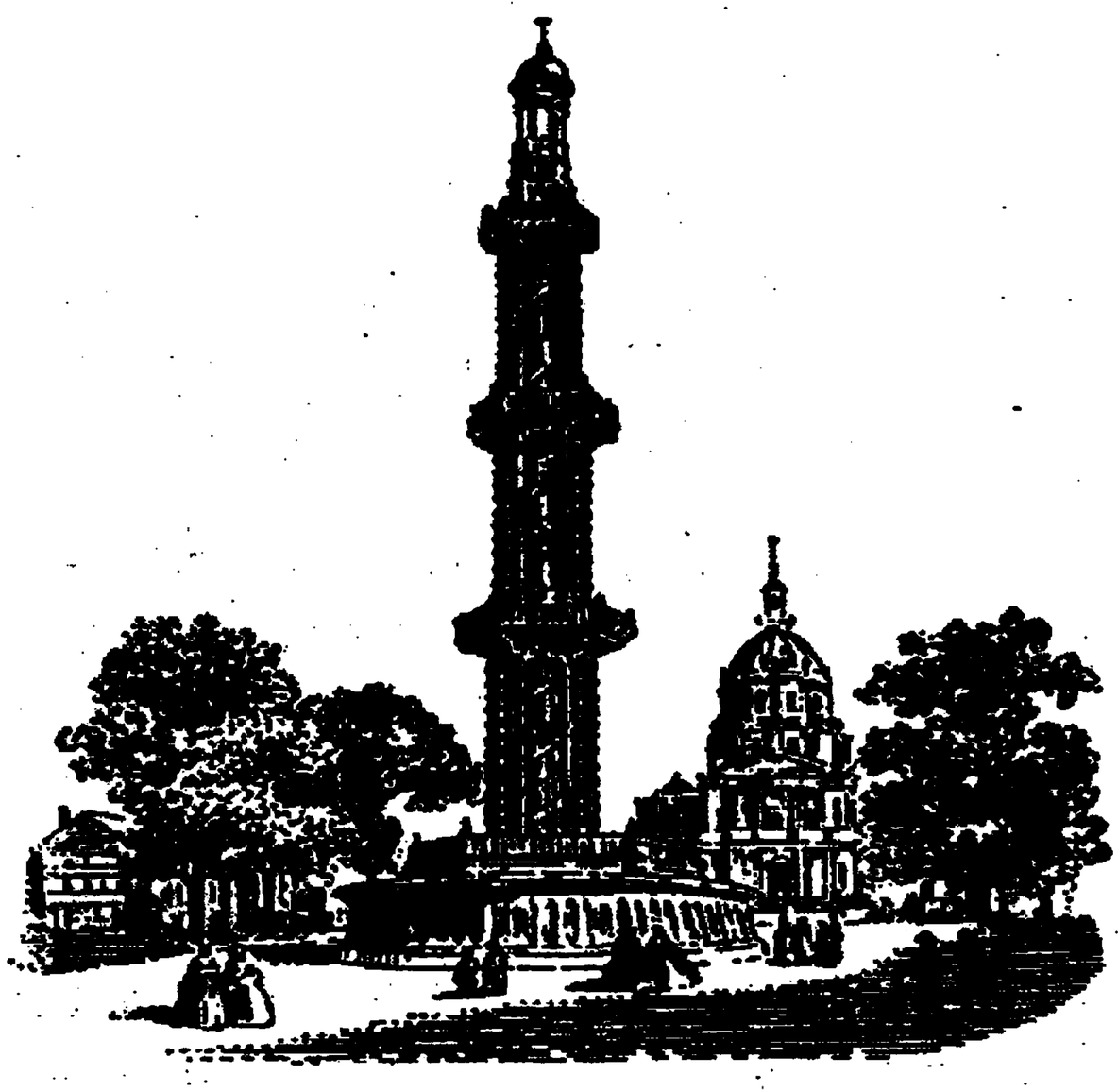


Fig. 209. El pozo artesiano de Grenelle, París. Mediados del siglo XIX.

las cañerías a mucha mayor presión; James Nasmyth creó la primera válvula de compuerta apropiada; y las tuberías de hierro colado, que se generalizaron, eran no sólo fuertes y muy duraderas, sino relativamente fáciles de instalar dentro de las casas. Las necesidades industriales de los tintoreros y blanqueadores de Lancashire impulsaron igualmente, aun antes de 1800, los intentos de utilizar la grava y la arena para la purificación del agua; en Londres los primeros filtros lentos de arena (p. 617) fueron construidos por James Simpson en 1827. Lancashire tuvo que arrostrar también el problema especial de salvaguardar los intereses de los aún numerosos mo-

linos movidos por agua: si una instalación para el abastecimiento de aguas desviaba el curso de un manantial o río, se necesitaba por lo general compensar con otro suministro a los propietarios de los molinos ribereños. Así, la construcción del embalse de los valles de los Peninos, destinado a proporcionar una fuente segura de abastecimiento, fue iniciada en la zona de Bolton en la década de 1820, y en 1848 la Manchester Corporation comenzó a trabajar en cinco diques para una serie de embalses en el valle de Longdendale, a 16 kilómetros al este de la ciudad, dos de los cuales estaban pensados únicamente para abastecer de «agua de compensación». El rendimiento resultó ser de 86.000.000 de litros al día, equiparable a los 208.000.000 de litros que suministraban las nueve compañías de agua en Londres en 1848-49; sin embargo, Manchester necesitó más agua al cabo de una sola generación.

En la segunda mitad del siglo XIX no solamente el continuado crecimiento de la población y de la industria (incluso la agricultura con sus especiales necesidades de riego), sino también los importantes cambios en las costumbres —puesto que la limpieza era inseparable de la piedad en una población que

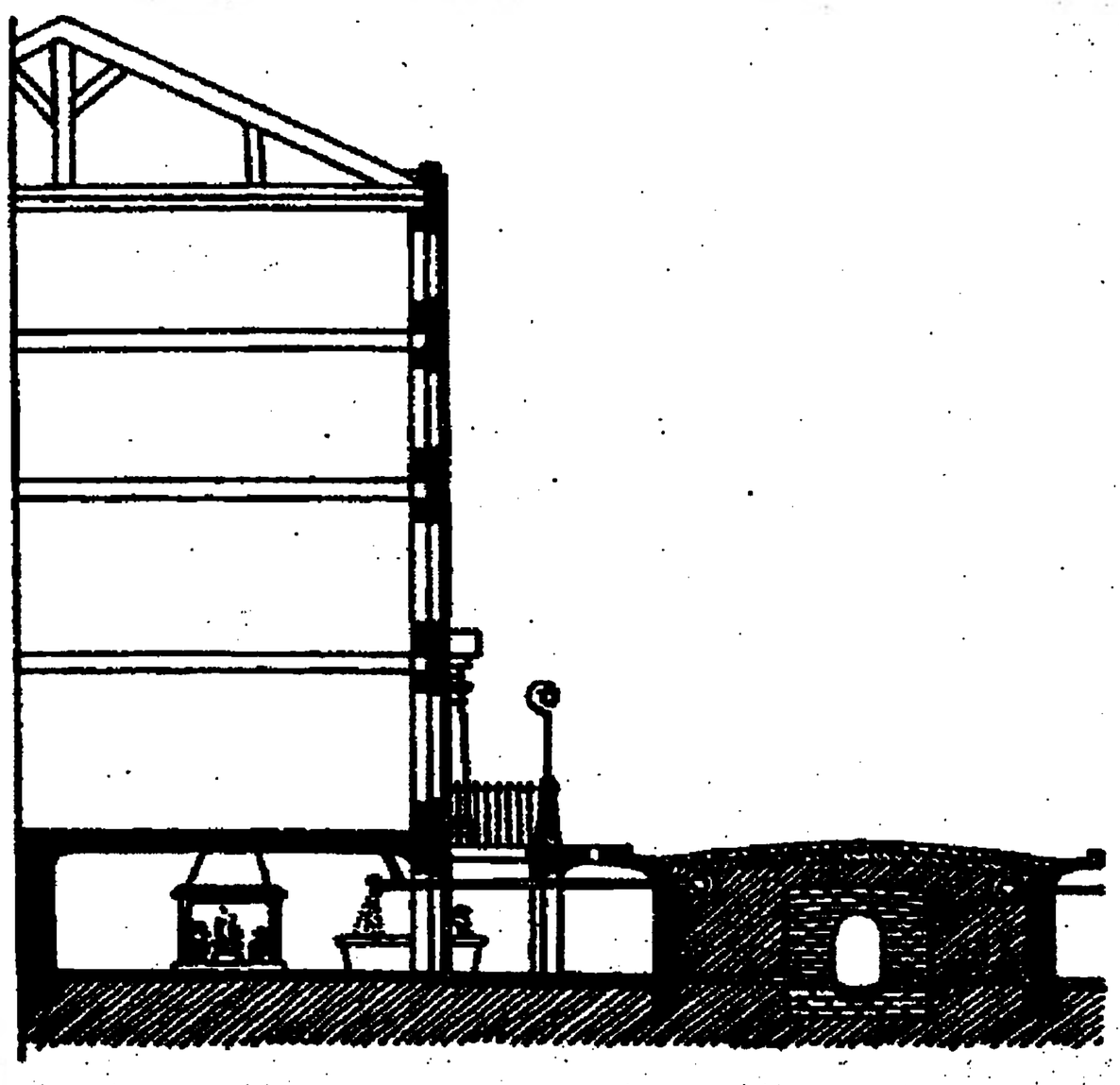


Fig. 210. Sección de casa y calle en Picadilly, Londres, mostrando los sistemas de abastecimiento de aguas y de evacuación de aguas residuales, a principios del siglo XIX.

aún era eminentemente temerosa de Dios— hicieron que la demanda de más y mejor agua se manifestara ampliamente. Además, el ambiente político en Inglaterra y en otros lugares era entonces favorable al desarrollo de los servicios municipales. Estos se hicieron cargo del abastecimiento de aguas que venían efectuando empresas comerciales, ya que podían reunir grandes préstamos para inversión y no necesitaban obtener beneficios. En Londres, en realidad, las compañías privadas sobrevivieron hasta 1902 y a finales del siglo suministraban una cantidad de agua cinco veces superior que en 1848, aunque nunca igualaron el vigor con que la autoridad municipal de París actuó bajo Napoleón III para sustituir por agua de manantial la del contaminado Sena. Ejemplo notable de iniciativa municipal fue Bradford, donde el agua blanda era esencial para la expansión de la industria lanera: entre 1855 y 1873 el suministro aumentó casi dieciocho veces. Como las fuentes locales de agua disponibles en las zonas industriales no se hicieron mayores o menos contaminadas con el paso de los años, los dos principales avances fueron el recurso a fuentes de suministro distantes y la introducción de mejores métodos de purificación.

Por ello, las grandes presas figuraron entre las más notables realizaciones de la ingeniería civil de este período. Las presas primitivas construidas en los Peninos, donde los valles son poco profundos y no hay base firme de roca, se hicieron principalmente con arcilla batida en el centro y con terraplenes apisonados en la parte exterior. Resultaron en general adecuadas, aunque la presa de Holmfirth, cerca de Huddersfield, fue minada por las filtraciones en 1852, y sólo doce años más tarde se produjo un sensacional desastre cuando el nuevo embalse de Dale Dyke, que iba a suministrar agua a Sheffield, se hundió mientras se llenaba y causó 244 víctimas. La razón del hundimiento de la presa en aquel caso no fue nunca totalmente determinada, pero se supone que su peso fracturó las tuberías de desagüe de

hierro colado que había debajo. Los ingenieros franceses creían que las presas de tierra eran peligrosas si su altura excedía de 18 metros, y poco después de 1850 realizaron los primeros proyectos de presas basados en principios científicos.

De Sazilly y Delocre se dieron cuenta de que la construcción de presas no consistía solamente en bloquear un valle con materiales de los que pudiera razonablemente esperarse que no se deslizaran o vinieran abajo; era necesario tener en cuenta también las presiones internas. Su resistencia debía ser suficiente para soportar la máxima presión en el paramento de aguas arriba de la presa cuando el embalse estaba vacío y en el paramento de aguas abajo cuando estaba lleno. Delocre era también partidario del principio de hacer el paramento de la presa ligeramente convexo, de manera que parte del empuje del agua se transmitiera a la tierra a cada lado, del mismo modo que el peso de un arco se comunica a sus pilares. La presa de Furens, de 56 metros, terminada en 1866 para suministrar a St. Etienne agua de un afluente del Loira, fue la primera que se construyó basándose en estos principios, y durante un tiempo fue la presa más alta del mundo. En Inglaterra la primera presa alta de mampostería no se terminó hasta 1891, cuando el río Vyrnwy, el principal afluente galés del Severn, fue bloqueado por una obra de fábrica más baja que la de Furens, pero más maciza, un tercio de cuyas piedras pesaba cada una de 4 a 10 toneladas (fig. 211). Esta iniciativa de Liverpool fue seguida en 1894 por la terminación de la presa de Thirlmere, para suministrar agua a Manchester, estando también en construcción antes de acabar el siglo las presas del valle del Elan, que surten a Birmingham. En las regiones donde los valles son más estrechos y tienen laderas más empinadas que en Gales y en la región de los lagos, la solución no consistió sólo en un paramento superior ligeramente convexo, como el que proponía Delocre, sino en el diseño de un verdadero arco horizontal. La

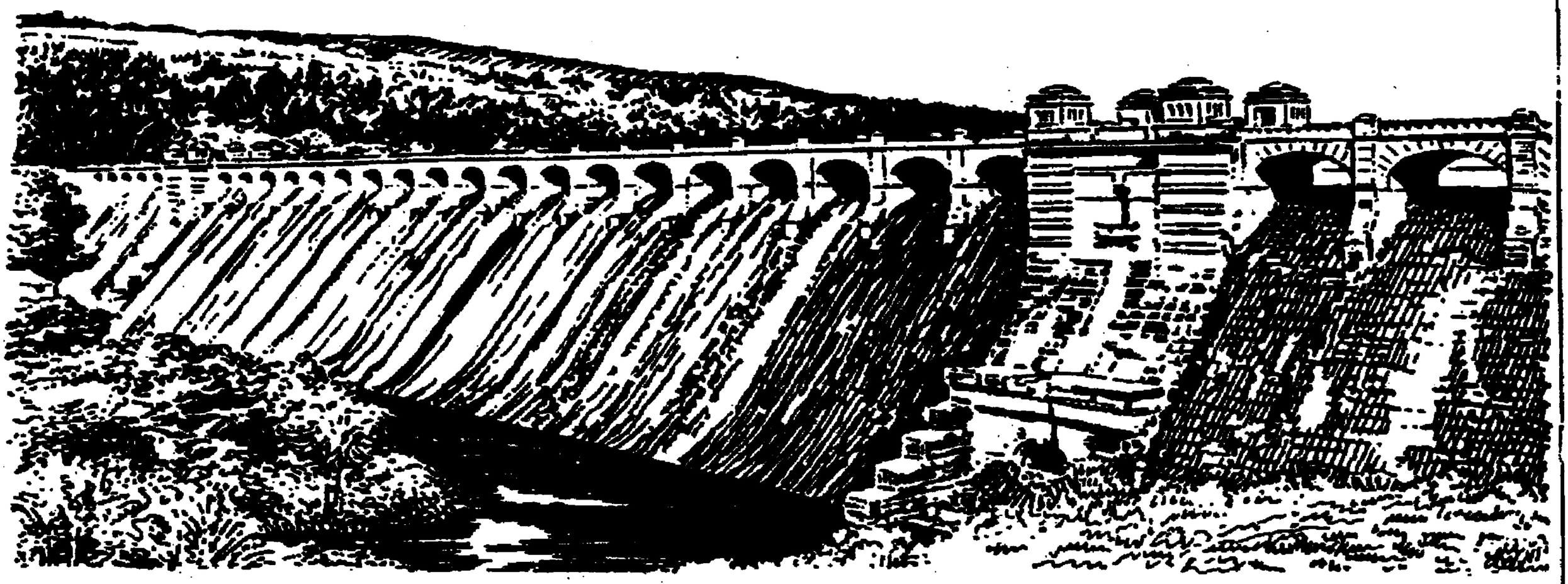


Fig. 211. Presa del Vyrnwy, terminada en 1891. Tiene aproximadamente unos 322 m. de longitud y puede embalsar más de 54.500 millones de litros de agua.

presa de Zola, construida en 1843 cerca de Aix-en-Provence, fue la primera de este tipo; otra fue la presa para riego del valle de Bear, en California, construida en 1884, con un radio de curvatura de 102 metros. Las presas en arco, sin embargo, no se generalizaron hasta el siglo xx.

El transporte de agua desde cuencas distantes implicaba la construcción de acueductos comparables a las grandes obras de los romanos: el acueducto de 82 kilómetros, construido entre 1839 y 1847 para abastecer a Marsella, cruza un río a una altura de casi 91,5 metros sobre un puente de piedra de tres pisos y 396 metros de longitud que recuerda y aun supera el esplendor del no muy distante Pont du Gard (p. 248). En Nueva York, entre 1885 y 1893 se abrió en la roca un túnel de 48 kilómetros en línea recta desde Croton Lake a Central Park, con treinta pozos de ventilación a una profundidad media de 36 metros; el revestimiento de ladrillo alcanza hasta casi 60 centímetros de espesor. Su sección transversal de herradura de 15 metros cuadrados excede con mucho la de los acueductos europeos, pero el acueducto de Thirlmere a Manchester tiene una longitud

de 155 kilómetros y los que surten a Liverpool y Birmingham son cada uno de unos tres cuartos de esa longitud. Las cañerías requeridas para mantener el agua a alta presión pudieron ser satisfactoriamente hechas de hierro colado, pero las grandes tuberías fueron reforzadas también con chapas de hierro forjado remachadas juntas. A partir de 1860 se prefirió el acero, especialmente en América, pero la distribución desde las cañerías a los consumidores continuó haciéndose por tuberías de hierro colado. Los primeros contadores se instalaron en 1873 para evitar el despilfarro; el público, sin embargo, pronto contrajo el hábito de cerrar los grifos cuando hacerlo no suponía ya el peligro de perder un suministro intermitente.

Hasta finales del siglo XIX la calidad del agua potable no se pudo juzgar de otro modo que por la transparencia, la ausencia de sabor y olor y la falta de efectos nocivos detectables. La Ley del Agua de Londres de 1852, que prohibió a las numerosas compañías de agua de la metrópoli abastecerse de la subida de la marea del Támesis o distribuir agua sin filtrarla, es un hito importante, pero hasta dos años más tarde el famoso anestesista John Snow no pudo demostrar concluyentemente que debía relacionarse un brote de cólera en el Soho con la contaminación por excrementos humanos de una determinada fuente en Broad Street. Desde la década de 1860 el desarrollo de la bacteriología por Pasteur, Koch y otros dio una base científica a la purificación del agua, y hacia 1885 el abastecimiento de agua de Londres fue sometido a análisis sistemáticos. Los resultados demostraron que, mantenidos en condiciones apropiadas, los filtros de arena, ideados originalmente para eliminar sólidos inanimados en suspensión, quitaban también hasta el 98 por 100 del contenido bacteriano.

El primitivo filtro de arena actuaba sólo por gravedad, cayendo el agua a través de capas de arena

y grava a razón de unos 140 litros/metro cuadrado a la hora. Adolecía de tres defectos: era lento, requería una laboriosa atención y ocupaba mucho espacio, especialmente cuando se añadieron estanques decantadores previos para separar los sólidos más gruesos antes de pasar al filtro propiamente dicho: a finales del siglo, sólo en Londres los filtros de este tipo ocupaban unas 60 hectáreas. De aquí el desarrollo de los filtros de presión, especialmente en Francia, algunos de los cuales filtraban hasta cien veces más aprisa que el primitivo filtro lento de arena; pero no eran desde el punto de vista médico muy seguros, habiendo sido aprobados principalmente con vistas a la clarificación de agua para usos industriales. En 1880 se patentó en Inglaterra un tipo mejor de filtro rápido de arena; este filtro sustituía la laboriosa limpieza a mano de la arena por una agitación de la superficie con potentes chorros de aire lanzado desde abajo, con lo que se separaba y quitaba el barro. Los americanos, sin embargo, encontrando que los filtros de arena existentes para el tratamiento del agua de sus ríos, frecuentemente cargados de limo, no eran convenientes, desarrollaron otro tipo de filtro rápido de arena que tenía un agitador mecánico empotrado en la propia arena.

A partir de 1857 se utilizó en Europa el hidróxido de hierro gelatinoso para reunir y precipitar las impurezas en suspensión, pero el empleo del hidróxido de aluminio para este fin, aunque finalmente adoptado hasta cierto punto en Europa, empezó a gran escala en América en la década de 1880. Estos métodos resultaron tan eficaces como el filtrado y mucho más rápidos. La cloración, que en el siglo xx llegó a ser una protección normal para todas las principales organizaciones de abastecimiento de aguas, se usó primero como medida de emergencia para combatir las epidemias tifoideas de Pola, en Italia, y Maidstone, en Inglaterra, en 1896 y 1897, respectivamente. Se había aplicado, sin embargo, mucho antes para el tratamiento de aguas residuales.

DESAGÜE Y SANEAMIENTO

En 1900 el ingeniero civil estaba ganando la larga batalla por la limpieza pública, batalla que en 1800, y aun en 1850, podía todavía haber parecido perdida. En realidad existían tres problemas: deshacerse del agua de lluvia que podía inundar las ciudades, de las diversas basuras que en el curso del tiempo harían intransitables las calles y de la materia orgánica en descomposición, que, como lentamente verificaron los expertos sanitarios del siglo XIX, no era meramente una molestia desagradable, sino un grave peligro para la salud. Para una población pequeña, diseminada y poco escrupulosa, estos problemas no presentaban serias dificultades, pero al final del siglo XVIII una ciudad como Londres, con más de un millón de habitantes, tuvo que probar varias soluciones, todas las cuales resultaron cada vez más inadecuadas. Desde el gran incendio de 1666, habían sido previstos oficialmente vertederos de basuras en las calles de la City, desde los que éstas eran trasladadas por un personal pagado de «rastrilladores». El contenido de las letrinas era vaciado por poceros a las horas en que las calles estaban desiertas: el servicio se prestaba cada veinticuatro horas en los mejores distritos, y era menos frecuente y menos regular en los más pobres. Tanto los rastrilladores como los poceros obtenían considerables beneficios de la venta de buena parte de lo que recogían para usos agrícolas o de otros tipos; el resto se quemaba, se vertía en lugares adecuados o se tiraba al mar.

Pero en esta coyuntura el *water-closet*, descrito por Sir John Harington 200 años antes, estaba empezando a ser instalado en las casas de la clase alta en las que el suministro de agua lo permitía (fig. 212). El *water-closet* patentado por Joseph Bramah en 1778 constaba de dos válvulas, y cuando se limpiaba con un chorro de agua su contenido caía directamente en un pozo negro situado en el sótano o bajo el jar-

dín. En 1782 fue patentado por primera vez un sifón con cierre hidráulico; pero aunque éste llegó a ser parte normal del equipo del *water-closet*, la existencia del pozo negro, que se vaciaba aproximadamente una vez al año, constituía un doble peligro para la salud, por los efluvios que comúnmente entraban en la casa y por las filtraciones que contaminaban los pozos, los ríos, e incluso las tuberías del agua imperfectamente unidas de aquel período. Se prohibió

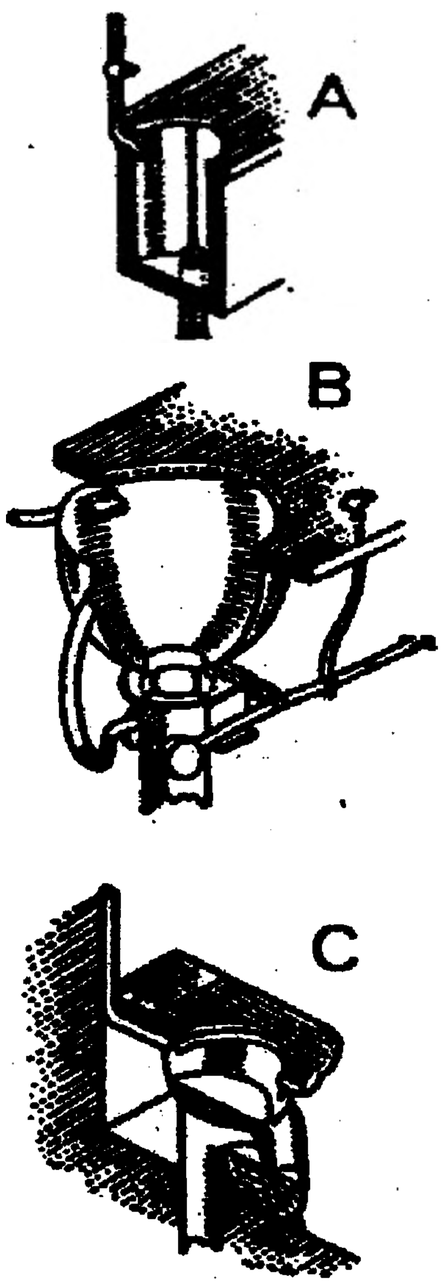


Fig. 212. Evolución del *water-closet*: A) diseño original de Sir John Harington, 1596; B) *water-closet* de Bramah, 1778; C) *water-closet* del siglo XIX con cierre hidráulico.

estrictamente a todo propietario de casa de Londres, aunque no siempre con éxito, que los *water-closets* descargaran en una alcantarilla, pues éstas eran entonces simples cursos de agua revestidos de ladrillo por encima y destinados a desaguar en el Támesis el agua que corría por la superficie.

El remedio que se halló para esta situación fue construir un nuevo tipo de alcantarilla, que se limpiaba abundantemente con un suministro de agua más regular que el que proveía la lluvia y podía ser usada para acarrear la basura en suspensión por

vías subterráneas para su evacuación final en puntos bien alejados del área urbana; éste fue un logro característico de los grandes municipios en la segunda mitad del siglo. Hamburgo, reedificada después de un gran incendio en 1843, fue quizá la primera ciudad importante que construyó una red completa de alcantarillado, que se limpiaba concienzudamente con agua del río cada semana. El alcantarillado de París tenía en 1863 una longitud total casi cinco veces superior a la de 1837, y al construir nuevas alcantarillas la ciudad aprovechó la oportunidad para hacer sus calzadas convexas en vez de cóncavas, con canales de desagüe a cada lado y espacio muerto para la alcantarilla bajo el centro: el colector prin-

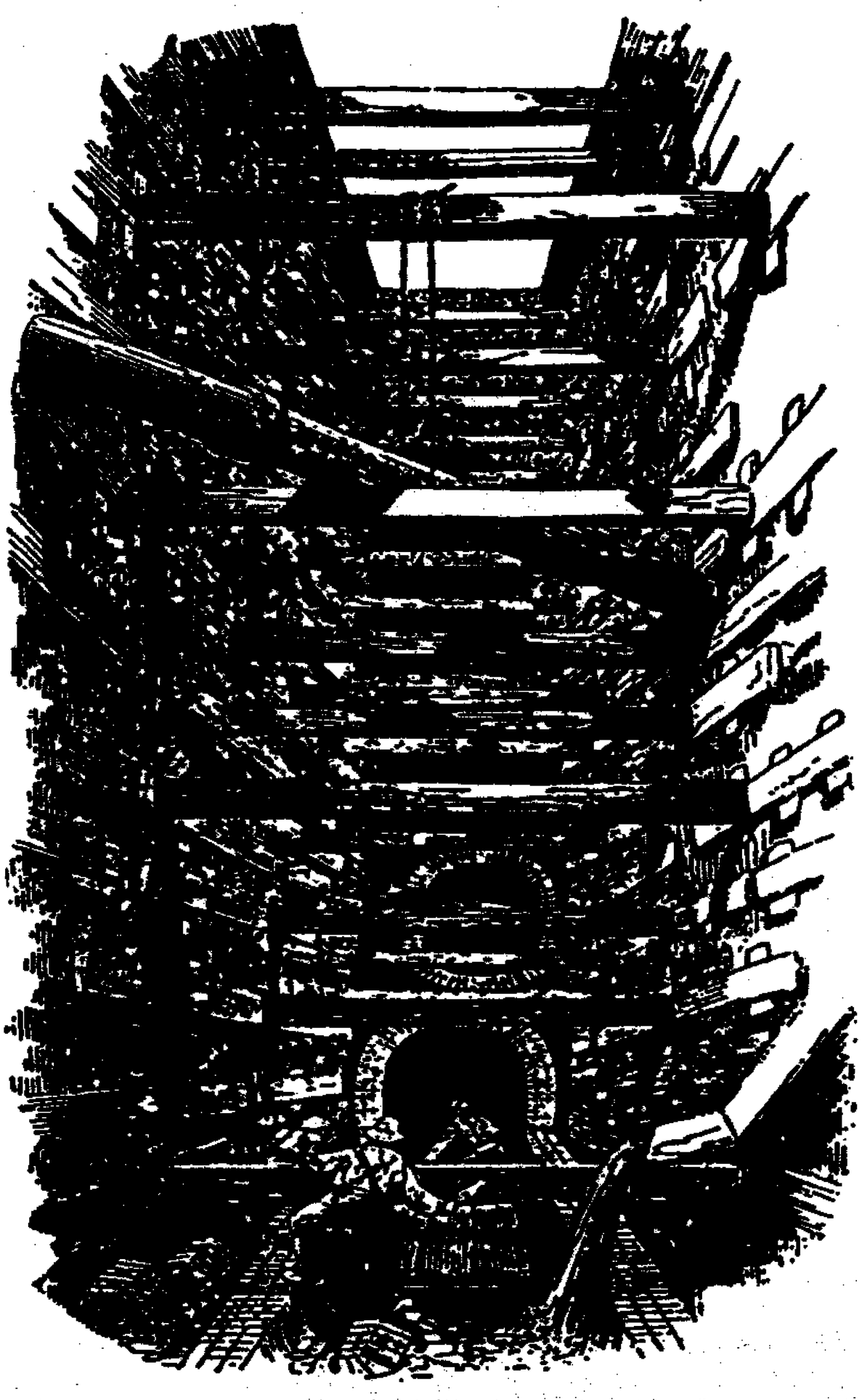


Fig. 213. Excavación de una alcantarilla bajo Fleet Street, 1845.

cipal, sin embargo, al que convergían las alcantarillas bajo la plaza de la Concordia, desaguaba en el Sena a una distancia de sólo 5 kilómetros de la ciudad. Una parte de la red de alcantarillado de Londres fue construida en la década de 1840 (fig. 213). Pero la obra de Sir Joseph Bazalgette, ingeniero de la Junta Metropolitana de Obras, creada en 1855 después de que 20.000 londinenses murieran en dos epidemias de cólera, proporcionó un remedio más drástico para la situación particularmente horrible de Londres, donde los bancos de fango malolientes proclamaban el hecho de que el río Fleet (fig. 214) y otras alcantarillas limpiadas por agua de lluvia estaban descargando vastas cantidades de desperdicios domésticos en el Támesis, que eran llevados por la marea de acá para allá incluso en el corazón de la capital.

Bazalgette construyó cinco alcantarillas principales paralelas al curso del Támesis, tres en la orilla norte y dos en la orilla sur, que tendrían capacidad para conducir todas las aguas residuales domésticas, junto con el desagüe normal del agua de lluvia. Sólo en el supuesto de un aguacero anormal era necesario que el exceso de agua de lluvia —que llevaba consigo algunas aguas residuales diluidas— fluyera por los rebosaderos en las alcantarillas de la vieja red principal conectadas con el río. El malecón del Támesis, que sustituyó al antiguo banco de fango, señala parte del curso de una de las nuevas alcantarillas. Como éstas descargaban a unos 19 kilómetros más abajo del Puente de Londres, se necesitaban tres estaciones de bombeo para elevar su nivel, de modo que las aguas residuales pudieran fluir por gravedad y mantener una velocidad media de 2,5 kilómetros/hora con la alcantarilla medio llena. Las grandes alcantarillas de ladrillo eran alimentadas por una red de otras más pequeñas, con una sección aproximadamente oval pero más estrecha en el fondo; esta forma permite el máximo de velocidad de flujo cuando hay poco líquido. Construidas de ladrillo unido con cemento Portland, las alcantarillas de

Bazalgette, protegidas por su posición subterránea de los efectos de los cambios de temperatura, resultaron muy duraderas; sin embargo, el desgaste del fondo y el peligro de obstrucción hicieron necesario proveerlas de medios de acceso y pozos de ventilación para las personas encargadas del entretenimiento. El mejor método resultó ser la construcción del mayor número posible de ventiladores en el centro

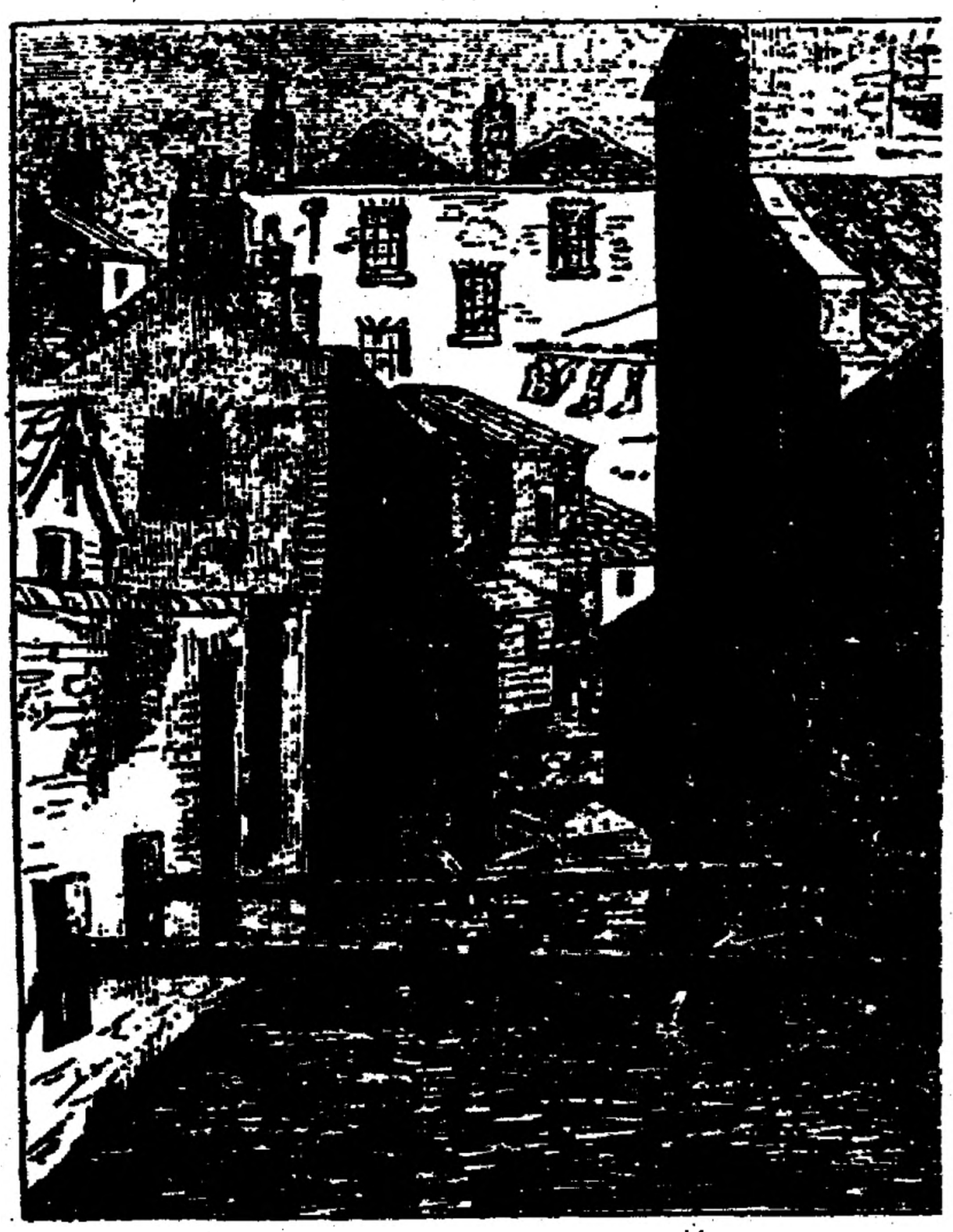


Fig. 214. El río Fleet, 1844.

de las calzadas: uno de los experimentos menos afortunados de Bazalgette fue el de tratar de acabar con el aire fétido de las alcantarillas aspirándolo hasta un horno construido en la Torre del Reloj del Parlamento.

Quedaba el problema de disponer de las aguas cloacales. Al principio vertían todas en el Támesis, pero esto resultaba muy desagradable para la población local que vivía a las orillas del río aguas abajo de Londres. Utilizarlas en la tierra era imprac-

ticable en tan grandes cantidades, aunque se hizo con éxito en sitios más pequeños como Salisbury. Por eso se desarrolló un sistema de clarificación química en los puntos de vertido tanto al norte como al sur del río. Las aguas residuales no contenían normalmente más que un 0,1 por 100 de materia sólida, y la mitad de ella aproximadamente era arena o partículas inocuas: así pues, el problema se reducía al tratamiento de la restante materia orgánica para impedir que absorbiera oxígeno al descomponerse, desprendiendo gases perjudiciales y destruyendo la vida de los peces y las plantas del río. No menos de 500 patentes de precipitantes químicos fueron obtenidas en 1894, pero en los puntos de vertido de Londres se continuó usando una mezcla de cal y sulfato ferroso, siendo similar el proceso al usado para purificar el agua potable (p. 618): las aguas residuales se cribaban para separar los sólidos mayores y luego se trataban dos veces con el precipitante. El producto final era un cieno que contenía un 7 por 100 de materia sólida, que era arrojado al mar desde barcos.

Londres, a causa de su tamaño, e Inglaterra, por la densidad general de su población, presentaban los problemas de evacuación de las aguas residuales en su forma más aguda. En otras partes del mundo, como Alemania y los Estados Unidos de América, sólo se realizaba, con frecuencia, el cribado de los sólidos mayores, descargándose el resto de las aguas residuales directamente en los grandes ríos o lagos. El mayor espacio disponible en algunos países indujo también a experimentos de secado del cieno para el consiguiente uso como abono, del mismo modo que las diversas basuras acumuladas en las comunidades urbanas se transformaban en materia aprovechable gracias al incinerador, utilizado para este fin en Nottingham en 1876. Al final del siglo estos incineradores habían sido adaptados para proporcionar parte de la energía térmica para las nuevas centrales eléctricas.

15. LA CONSTRUCCION: LAS EXIGENCIAS DEL TRANSPORTE

LA CONSTRUCCION DE CARRETERAS

A los ingenieros civiles les correspondió la tarea de imprimir sobre la faz de la tierra tres de las características representativas de la moderna sociedad industrial: las carreteras siempre transitables, los canales y el ferrocarril. No dejaron una huella parecida en el mar, pero la mayor velocidad y eficiencia de la navegación condicionó la mejora de los puertos y de los muelles e hizo igualmente que el mundo se viese salpicado de faros. La construcción de carreteras puede ser considerada en primer lugar, puesto que representa la forma más antigua de comunicación; al menos en la Europa occidental, esta actividad se centró más bien en la mejora de las antiguas carreteras que en el trazado de nuevas vías a través de nuevas rutas. No obstante, hasta 1900 la carretera, en la mayoría de los países, desempeñó un papel poco importante dentro del intercambio general de alimentos y materias primas por productos manufacturados que constituía la característica esencial del progreso industrial.

Como vimos anteriormente (p. 274), las carreteras francesas fueron admiradas y hasta cierto punto copiadas por el resto de Europa durante mucho tiempo. Los franceses también estaban a la cabeza de los demás países en cuanto al trazado de mapas de su país (p. 334), del que en parte dependía el desarrollo lógico de un sistema de carreteras. En el año 1787 William Roy, valiéndose del teodolito de Ramsden, llevó a cabo una triangulación que unía a Londres con puntos ya establecidos de la costa del norte de Francia. Pero aunque el Servicio Cartográfico se puso en marcha tan sólo cuatro años más tarde,

la triangulación de Gran Bretaña no se terminó hasta el año 1852, fecha en que ya muchos países europeos habían levantado planos de su territorio nacional comparables a los de la serie británica conocidos como de una pulgada. En los Estados Unidos, donde no se realizó ninguna triangulación hasta después de 1830, el trazado de mapas de las regiones interiores fue considerado de interés federal en el año 1879, un año después de que se terminase el segundo reconocimiento topográfico completo de Francia.

Dos décadas antes de que Arthur Young, el último gran observador de la vida provinciana bajo el Antiguo Régimen, cabalgase a través de Francia hasta los Pirineos y dejase anotado que algunas de las carreteras eran «ciertamente nobles», P. M. J. Trésaguet introdujo un nuevo sistema de construcción de carreteras en tres capas. Su sistema representaba una mejora con respecto a los trabajos anteriores de la École des Ponts et Chaussées, colocando las piedras del firme uniformemente con los cantos hacia abajo, apisonando esta capa hasta darle un contorno paralelo al que iba a tener el peralte de la superficie y empleando piedras más pequeñas y más duras en la capa superior. Esta capa superior debía tener 7,5 centímetros de espesor y las dos capas inferiores debían tener de 15 a 17,5 centímetros entre las dos. Esto representaba un ahorro de la mitad de los materiales en comparación con las calzadas normales de piedra anteriores, que tenían un espesor de 45 centímetros en el centro y de 30,5 centímetros en los lados. Pero la deuda contraída con Trésaguet por los constructores de carreteras posteriores se deriva fundamentalmente de sus instrucciones con respecto al material a utilizar para la capa superior: «La última capa debe estar hecha de trozos del tamaño de una nuez pequeña aproximadamente». Sus carreteras también tenían la ventaja de que en ellas se evitaba un peralte demasiado pronunciado que, con frecuencia, era peligroso. Sostenía que en Limoges

—zona a la que se refería Young en el comentario antes citado— duraban diez años cuando se cuidaba su conservación adecuadamente, si bien la conservación fuese un factor incierto mientras existió el sistema de *corvée*, dado que este tipo de trabajo forzado sólo se llevaba a cabo durante la primavera y el verano; sin embargo, cuando en 1789 tuvo lugar en Francia la abolición de este sistema, desapareció el último pretexto para la utilización de la antigua sección más gruesa.

La mayoría de los ingenieros de camino franceses adoptaron el nuevo método, que se extendió a Europa central, a Suiza, e incluso a Suecia. La construcción de carreteras fue una empresa característica de los déspotas ilustrados de finales del siglo XVIII: José II de Austria, por ejemplo, continuó la labor de sus dos predecesores de la casa de los Habsburgo, construyendo una carretera a través del puerto de Arlberg; Catalina la Grande dio comienzo a la gran carretera siberiana en el año 1781 y durante el reinado siguiente se empleó un revestimiento de carreteras de tipo inglés en la «Ciudad del zar» (Tsarskoe Selo), al sur de San Petersburgo. Pero fue Napoleón quien dio mayor impulso a la construcción de carreteras con su política de establecer catorce calzadas imperiales que partiesen de París, con el fin de dar mayor agilidad al movimiento de tropas y mercancías hasta las fronteras de sus dominios, y quien llevó a cabo la organización de los ingenieros del ejército y de un organismo central de interventores de carreteras para realizar sus ambiciones. Por ejemplo, en Suiza, donde ingenieros del país ya habían hecho algunos planos antes de la conquista por los franceses, dos brigadas de zapadores franceses estuvieron trabajando en un tramo de 77 kilómetros de la carretera del Simplón que fue abierta en 1805; la carretera del monte Cenis estaba completamente reconstruida hacia 1810 y en ese mismo año 17.000 vehículos pasaron a través del puerto desde Saboya a Italia; asimismo las tropas de ocupación francesas

trabajaron en otras carreteras claves en lugares tan apartados como Hamburgo y las Provincias Ilíricas.

Por su parte, en Gran Bretaña el antiguo sistema, tan dado a la inercia, que seguía considerando la conservación de las carreteras como una obligación meramente local a cargo de las parroquias, dio paso no a un centralismo ilustrado, sino a unos organismos oficiales establecidos al efecto llamados portazgos [Turnpike Trusts]. La gran carretera del norte fue sometida por primera vez a un portazgo en 1663; pero hasta la difícil persecución de los jacobitas hasta Culloden en 1746 por el duque de Cumberland no se consideró que era de urgente interés nacional el contar con mejores carreteras. El resultado fue que durante el período inmediatamente anterior al comienzo del reinado de Jorge III, cuando los incentivos económicos aumentaron tan drásticamente, ya se estaban creando portazgos a un promedio de unos treinta al año. Los portazgos, cada uno de los cuales controlaba un tramo de carretera por el sistema de peaje, eran ciertamente un medio imperfecto para el fin perseguido y sólo la mitad aproximadamente del dinero recogido fue empleado en verdaderos trabajos viales. Sin embargo, hasta mediados del siglo XIX este sistema de portazgos múltiples fue el rasgo característico de las carreteras inglesas. En la época de su apogeo los portazgos llegaron a gastar hasta 2 millones de libras al año (cifra correspondiente a 1809) en reparaciones de carreteras, proporcionaron las pistas por las que competían y corrían los coches y las sillas de posta, y consiguieron que Telford y McAdam trabajasen para ellos.

Thomas Telford tuvo una gran fama como constructor de puentes, canales y puertos, pero su profesión original de peón de albañil es la más directamente relacionada con su trabajo como constructor de carreteras. Empezó prestando sus servicios en este sentido en los portazgos del condado de Shrosphire, pero fue luego contratado por el gobierno para mejorar la carretera de Carlisle a Glasgow

y las carreteras de las Highlands de Escocia, que habían sido construidas originalmente por el mariscal Wade con fines militares, así como para su trabajo más famoso, que fue el de dar a la ruta de Londres a Holyhead una categoría digna de la posición que entonces ocupaba como eslabón entre las dos capitales del recientemente ampliado Reino Unido. Cuando en 1830 se terminó la carretera de Holyhead, Telford preparó un proyecto similar para la gran carretera del norte, con el fin de reducir el trayecto a la capital escocesa en 32 kilómetros; pero el Parlamento no quiso dar su apoyo en vista de que la operación anterior, incluido el puente del Menai (p. 658) y las mejoras introducidas en el puerto de Holyhead, habían costado 733.000 libras. Existe un gran parecido entre los métodos de construcción de carreteras de Telford y los empleados por Trésaguet. La diferencia principal estriba en que Telford empleaba un firme o pavimento plano, lo que parece lógico en un antiguo albañil: lo hacía de piedras asentadas sobre su cava más ancha y alineadas transversalmente a la carretera, formando una superficie regular al suprimir los salientes y rellenar los intersticios con piedra picada. El centro de la carretera se construía luego hasta una anchura de 5,5 metros —siendo el peralte sólo de 1 por 6— usando piedras, de forma aproximadamente cúbica, lo bastante pequeñas para pasar a través de una circunferencia de 63,5 milímetros. Esta construcción tenía que hacerse en dos etapas, para que los primeros 100 milímetros fueran asentados poco a poco por el tráfico antes de añadir los 50 milímetros restantes. Más cerca de los bordes de la carretera, la cubierta tenía que ser, naturalmente, más delgada a causa del peralte, pero finalmente se extendía una capa de 38 milímetros de grava limpia por toda la superficie. Tanto la primera como la última característica fueron muy criticadas: el firme de piedras grandes por su coste y la grava porque se hundió entre las piedras, de modo que penetraban el agua y el hielo. Las

mismas piedras, se decía, no estaban suficientemente apretadas entre sí como para resistir el tráfico pesado.

John Loudon McAdam era escocés, como Telford, pero a diferencia de éste había hecho ya fortuna en América y era teniente de alcalde en su Ayrshire natal cuando hizo sus primeras experiencias en construcción de carreteras como director de una compañía de carreteras e inventor aficionado. En 1815 llegó a ser inspector general de las carreteras de Bristol, y, después de publicar una serie de manuales de construcción de carreteras, tuvo un cargo similar en

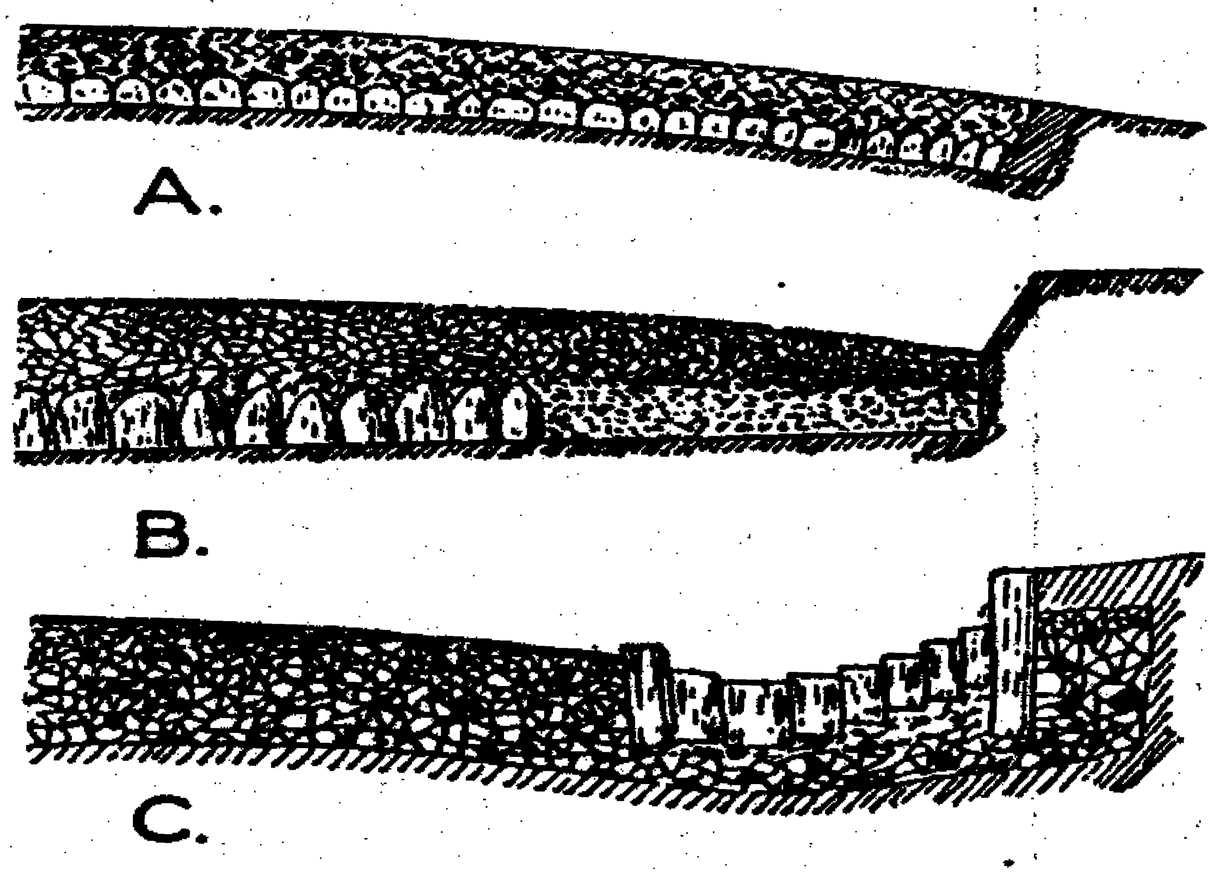


Fig. 215. Secciones de carreteras mostrando los métodos de: A) Trésaguet, 1764; B) Telford, 1824, y C) McAdam, hacia 1820.

el gobierno desde 1827 hasta su muerte, ocurrida en 1836, cuando ya era conocido internacionalmente. La novedad del principio de McAdam no fue el uso de piedras pequeñas, en el que tuvo muchos predecesores (fig. 215), sino las conclusiones que sacó de su proposición básica de que «es el suelo natural el que realmente soporta el peso del tráfico; mientras se conserve seco, aguantará cualquier peso sin hundirse». Prescindió totalmente del firme de piedra, contentándose con usar para este fin el suelo ya existente con tal de que pudiera mantenerse suficientemente seco construyendo zanjas o cunetas de desagüe a terreno más bajo o levantando el suelo unos milímetros por encima del nivel del agua. Tam-

bién razonó que «el grosor de una carretera no tiene importancia»: lo que tenía importancia era la construcción de una cubierta impermeable e indestructible sobre el suelo al que la carretera transmite el peso del tráfico; las cunetas de la carretera podían cumplir entonces su función propia, siempre que la carretera no fuese demasiado quebrada y el peralte la mantuviera libre de charcos. En cuanto a la piedra para la construcción de carreteras, McAdam propuso probar un tamaño que pasara por una circunferencia de 50 milímetros (13 milímetros menos que la de Telford), y permitir un peso máximo de 170 gramos cada una. Tenía que aplicarse en tres etapas, respetando cada vez cuidadosamente la forma del peralte, para que el tráfico pudiera tener la máxima oportunidad de consolidar la superficie; no había que hacer ninguna adición de grava.

En el curso del siglo XIX los vocablos «afirmada» y «macadamizada» llegaron a ser casi sinónimos en las descripciones de carreteras. En Inglaterra la nueva superficie llegó cuando los viajes en coche estaban en su apogeo: en 1832 se alcanzaba en todas las rutas principales una velocidad media de 16 kilómetros/hora, y el viaje Londres-Edimburgo, que en 1776 duraba aún cuatro días, podía hacerse ahora en 42 horas y media. El coche de cuatro caballos cedió terreno al ferrocarril más rápidamente en Inglaterra que en la mayoría de los demás países, pero en todas partes su llegada produjo en realidad un incremento en el total del tráfico tirado por caballos, integrado por trayectos más cortos a y desde la línea del ferrocarril. Las nuevas carreteras, sobre las que un caballo podía arrastrar un peso tres veces superior al que arrastraba sobre un camino no afirmado, continuaron satisfaciendo esta necesidad. Los libros de McAdam fueron traducidos a varias lenguas: ingenieros americanos acudieron a Inglaterra a estudiar sus métodos, con el resultado de que la carretera de Cumberland, la primera carretera nacional de los Estados Unidos, fue dotada de una su-

perficie macadamizada al este del río Ohio en 1832; y a finales de siglo un 90 por 100 de las principales carreteras europeas habían sido macadamizadas. Su fe en un firme de tierra no se aceptaría hoy como una buena práctica, pero tuvo la enorme ventaja de la baratura. Su sistema dio excelentes resultados en la reparación y reconstrucción de las carreteras existentes; con frecuencia se combinó la superficie macadamizada con una base de Telford. Hacia 1870 llevaban una importante delantera los constructores de carreteras del Reino Unido, donde la longitud de carreteras afirmadas por cada 1.000 habitantes era un poco más de 8 kilómetros, frente a menos de 5 en Francia, 3,75 en Prusia y sólo uno en España.

El pavimentado de las calles en las ciudades presentaba un problema aparte, que afectaba grandemente a la vida de las masas antes de que el tranvía y el tren barato matutino redujeran el coste del traslado del obrero al lugar de trabajo. Las aceras pavimentadas y elevadas, limitadas por bordillos, se introdujeron en Westminster en 1765 y en la City de Londres un poco más tarde. Sin embargo, un viajero americano afirma que no existían aceras en París todavía en 1811. En los distritos donde el tráfico pesado impedía el uso de una base macadamizada, se recurrió a una recomendación hecha por Telford en 1824: un firme de 30 centímetros de grueso de piedra picada, recubierto con un pavimento rectangular de granito (fig. 216), cuyas piedras medían, en las calles principales, unos 30 centímetros de largo por 15 de ancho y 25 de grueso, y se ajustaban entre sí como bloques de mampostería. Estos adoquines de granito, como se llamaron más tarde, resultaron muy duraderos y en general bien adaptados al tráfico urbano, excepto que eran casi tan ruidosos como los baratos guijarros del pasado; y tanto los adoquines como los guijarros, cuando estaban muy gastados, producían polvo. Los bloques de madera fueron una alternativa introducida experimentalmente en Londres, en 1838, procedente de Rusia: se ha-

bían usado en Nueva York tres años antes que en Londres, y un tipo creosotado parece haber tenido su origen en América en 1867. Pero el pavimento de piedra, aunque con una forma de adoquín más estrecha y —después de 1870— con el creciente uso de una base de hormigón, continuó predominando donde la densidad del tráfico de la ciudad justificaba el gasto de un afirmado especial para asegurar un recorrido libre de obstáculos; fue en 1870 cuando Disraeli describió el cabriolé Hansom enteramente montado sobre muelles, que existía desde hacía una generación, como «la góndola de Londres».

Fig. 216. Pavimentando una calle de Londres con adoquines de granito escocés.

El hormigón fue uno de los dos nuevos materiales que empezaron a utilizarse gradualmente para construir carreteras durante el siglo del triunfo de McAdam. Aunque hay uno o dos ejemplos anteriores del uso de firmes de hormigón en las carreteras y de un sistema de relleno de los intersticios que quedan en una superficie macadamizada con mortero de cal, la carretera de hormigón propiamente dicha apareció con la creciente disponibilidad de cemento

Portland (p. 590) en la década de 1850. Algunas carreteras de hormigón fueron construidas en Austria en esa década, la primera en Inglaterra data de 1865, y varios países continentales la imitaron; el primer ejemplo americano es una carretera hecha alrededor de un palacio de justicia de Ohio en 1892. La maquinaria para su construcción se inventó en Alemania en 1879; después de esta fecha no esperaba para extenderse más que las demandas de la era del motor.

La historia de la carretera de asfalto es algo similar, excepto que su desarrollo desde 1832 de De Sassenay en Francia descansaba en la obra hecha en el siglo XVIII. Una mezcla, fabricada cerca de Seyssel, de piedra de asfalto pulverizado y betún procedente de afloramientos de petróleo naturales, se estaba usando en 1835 a razón de 1.000 toneladas al año, cantidad que más tarde llegó a representar el consumo mensual, aunque en Londres no se introdujo hasta 1869. Mientras tanto se estaban poniendo en uso fuentes alternativas de asfalto, incluyendo el producto del lago de la Brea, en la isla de la Trinidad, que competía con el material producido en los Estados Unidos. Aún más importante fue el invento de dos procedimientos adicionales. Uno fue el uso de piedra de asfalto prensada, apisonada en la base de la carretera en forma de polvo. Este procedimiento fue introducido en París en 1854 y resultó muy duradero. Una mejora bastante posterior fue el uso de mortero bituminoso pobre, mezcla que en realidad incluía piedra caliza en polvo e incluso piedras de tamaño corriente así como arena; se aplicaba a una temperatura de 150-200° C y era extendido y apisonado cuando aún estaba caliente. Este material proporcionó una superficie de carreteras impermeable y fue introducido en América en la década de 1870 por el ingeniero belga E. J. De Smedt. Un desarrollo bastante paralelo tuvo el uso del pesado alquitrán de hulla, del que se podía disponer como derivado de la industria del gas. El alquitrán y las

piedras se mezclaban calientes, se extendían sobre la carretera y se consolidaban después de enfriarse con una capa final de arena por encima. Lo que llamamos «tarmacadam» fue ideado en Nottinghamshire en la década de 1830, introducido en América en 1873 y utilizado en un sistema de tres capas en Melbourne hacia 1890. Pero aunque los pavimentos de asfalto tuvieron una boga considerable —De Smedt colocó uno enfrente del Capitolio de Washington en 1876—, la verdadera importancia del asfalto y del alquitrán como materiales de construcción de carreteras corresponde a un período posterior, cuando la succión de los neumáticos de los rápidos vehículos de motor empezó a desmenuzar las carreteras macadamizadas en nubes de fino polvo, y se hizo esencial un nuevo tipo de superficie.

Aun cuando el uso de estos nuevos materiales requería claramente el mejoramiento de la máquina apisonadora, la maquinaria en general estaba ya haciendo más fácil la colocación de la superficie macadamizada. La primera machacadora de piedras se construyó en 1858 para las calzadas del Central Park de Nueva York; este medio de ahorrar trabajo se necesitaba más urgentemente en América que en Inglaterra, donde picar la piedra al borde de las carreteras continuó siendo hasta el siglo xx la ocupación regular y mal pagada de viejos menesteres. Varios tipos de apisonadora de hierro tirada por caballos habían sido propuestos durante el siglo xviii, pero su uso no fue propugnado ni por Telford ni por McAdam y no tuvieron mucha demanda antes de la década de 1830, cuando se extendió la práctica de consolidar la superficie de la carretera por etapas, utilizando primero apisonadoras más ligeras. La apisonadora de vapor, cuyo uso parece retrospectivamente tan obvio, fue introducida tardía y lentamente. Fue inventada en Francia en 1859, pero el modelo de mayor éxito (la apisonadora de 17,5 toneladas movida por un motor de 5 cv) fue creado por otro inventor francés en 1862. Una firma de Pa-

rís fabricó éste y otros dos modelos más pequeños a partir de 1864, pero se afirma que las apisonadoras de vapor inglesas fabricadas por Aveling y Porter desde 1866 (fig. 217) fueron las primeras plenamente eficaces.

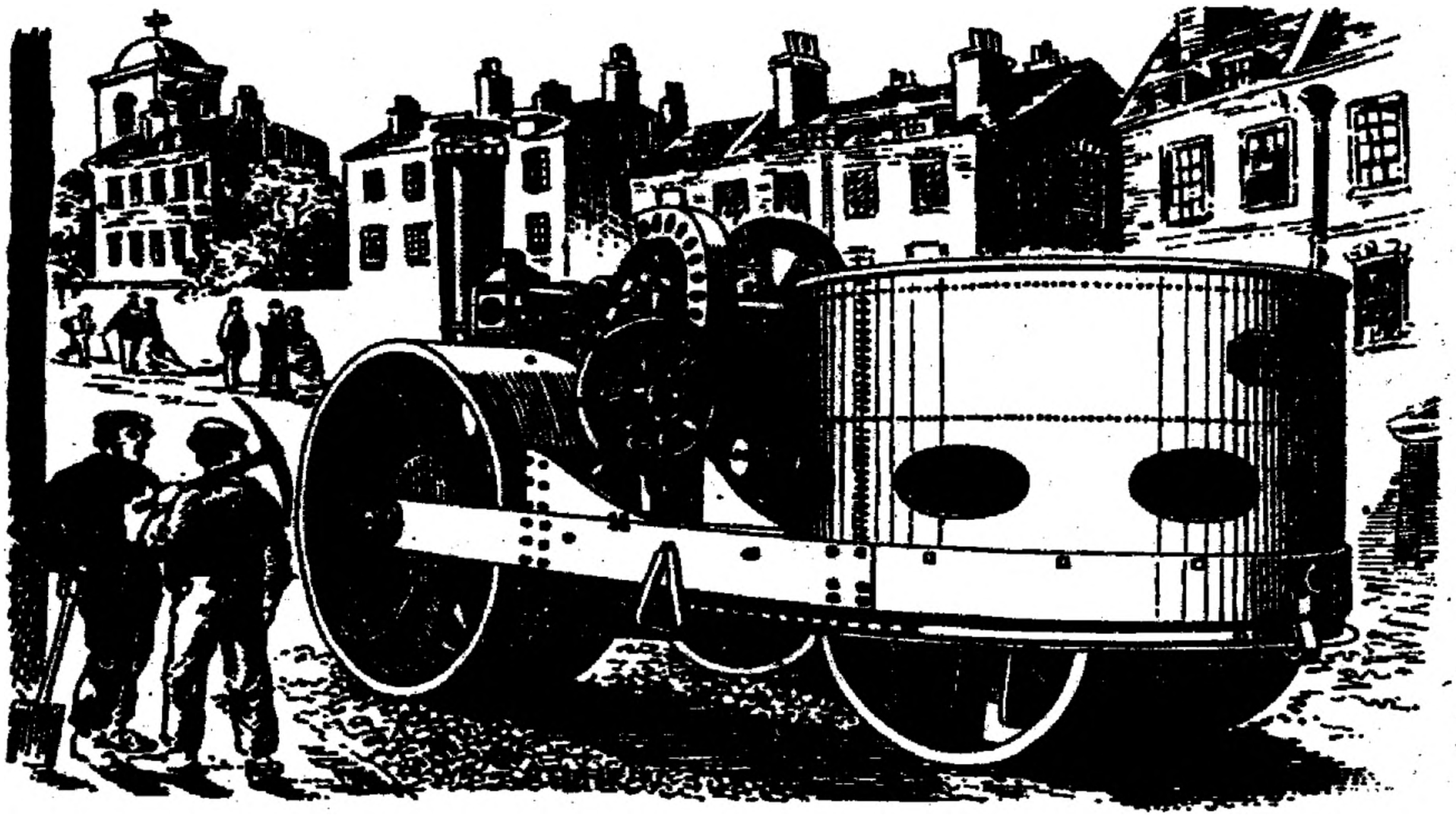


Fig. 217. Apisonadora de vapor, de Aveling y Porter, 1867.

CANALES Y REGULACIONES DE RIOS

Los canales de Gran Bretaña fueron obra en su mayor parte de sólo dos generaciones de ingenieros de canales, de los que Brindley, John Rennie y Telford son los más famosos. El más antiguo, el Sankey Navigation, que va desde la región carbonífera de St. Helens al Mersey, un cauce de 16 kilómetros con nueve esclusas, data de 1757, mientras que el último de la serie, el canal Caledonia, fue empezado por Telford en 1804, aunque no vivió lo suficiente para ver su terminación en la década de 1840. Por aquel tiempo estaban empezando a ser reemplazados por la red ferroviaria, y después de 1850 el canal navegable de Manchester, promovido por el entusiasmo local por tener un puerto en dicha ciudad, fue la

única construcción nueva de importancia. Pero en su momento de mayor extensión (en 1858) las vías navegables interiores tenían una longitud de unos 6.800 kilómetros (fig. 218), mientras que un siglo antes sólo llegaban a 1.600 kilómetros y estaban constituidas exclusivamente por regulaciones de ríos.

Había tres tipos principales de canales. Los más anchos, que eran algunas de las principales líneas y tenían los accionistas más optimistas, se hallaban principalmente al norte del Trent y el Mersey; por ellos podía navegar una barcaza de 4 metros de anchura y 17,5 metros de longitud. En las Midlands, donde el abastecimiento de agua era difícil con frecuencia, y donde se llegaba a Birmingham, por ejemplo, por medio de esclusas escalonadas a todo lo largo del trayecto, era usual un canal con esclusas de 2 metros; éstas permitían el paso de los familiares «barcos estrechos» que medían 2 por 20 metros. En tercer lugar, donde el dinero es muy escaso y las pendientes particularmente fuertes, como en el sudoeste y en Shropshire, existía un tipo de canal aún más pequeño, llamado *tub-boat*. Esta falta de construcción uniforme, que obligaba a transbordar las cargas de larga distancia e impedía el progreso en el diseño de las barcazas, ayuda a comprender la rápida sustitución, ya señalada, de los canales por los ferrocarriles. También es muy distinto el tipo de canal más antiguo, que seguía estrictamente las líneas de nivel dadas, del tipo posterior, que buscaba el camino más corto entre dos puntos. Al principio los salarios de los barqueros eran muy bajos y ninguna otra forma de transporte obligaba a aumentar la velocidad, por lo que los ingenieros de canales podían evitar la necesidad de hacer terraplenes o cauces, y los granjeros a través de cuyos campos serpenteaba su vía de agua se daban por contentos con los puentes de servicio que se hacían con facilidad (fig. 219). Cuando subieron los salarios y hubo la competencia de los coches y aun del ferrocarril, se pudo hacer un canal tan recto como lo que es

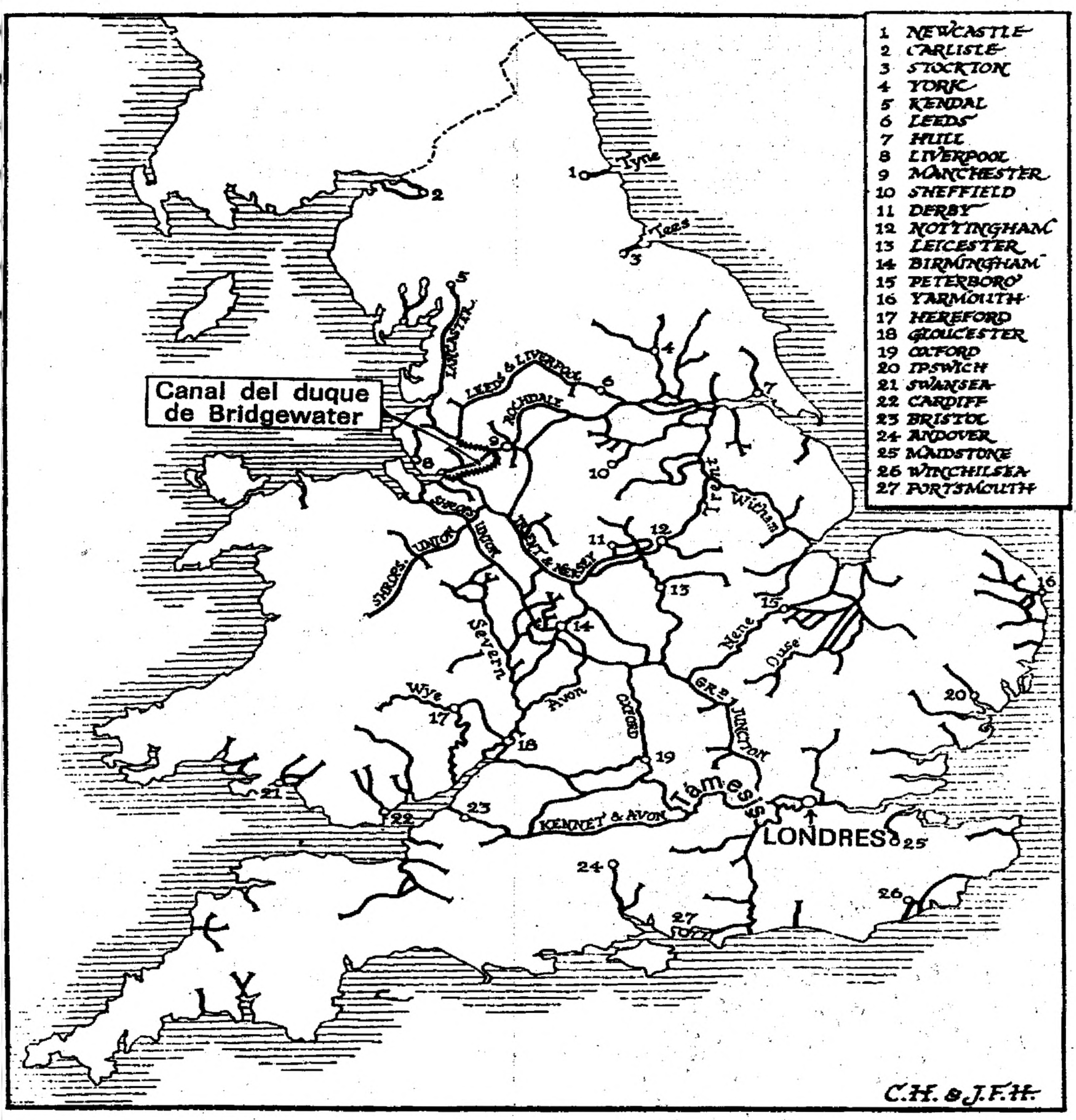


Fig. 218. Las vías navegables interiores de Inglaterra y Gales, 1858.

ahora la línea principal de la Shropshire Union. Esta se terminó en 1835 con numerosos terraplenes y un cauce de 3 kilómetros de longitud que es el más profundo del país. Algunos de los canales más antiguos fueron acondicionados también aproximadamente por aquel tiempo.

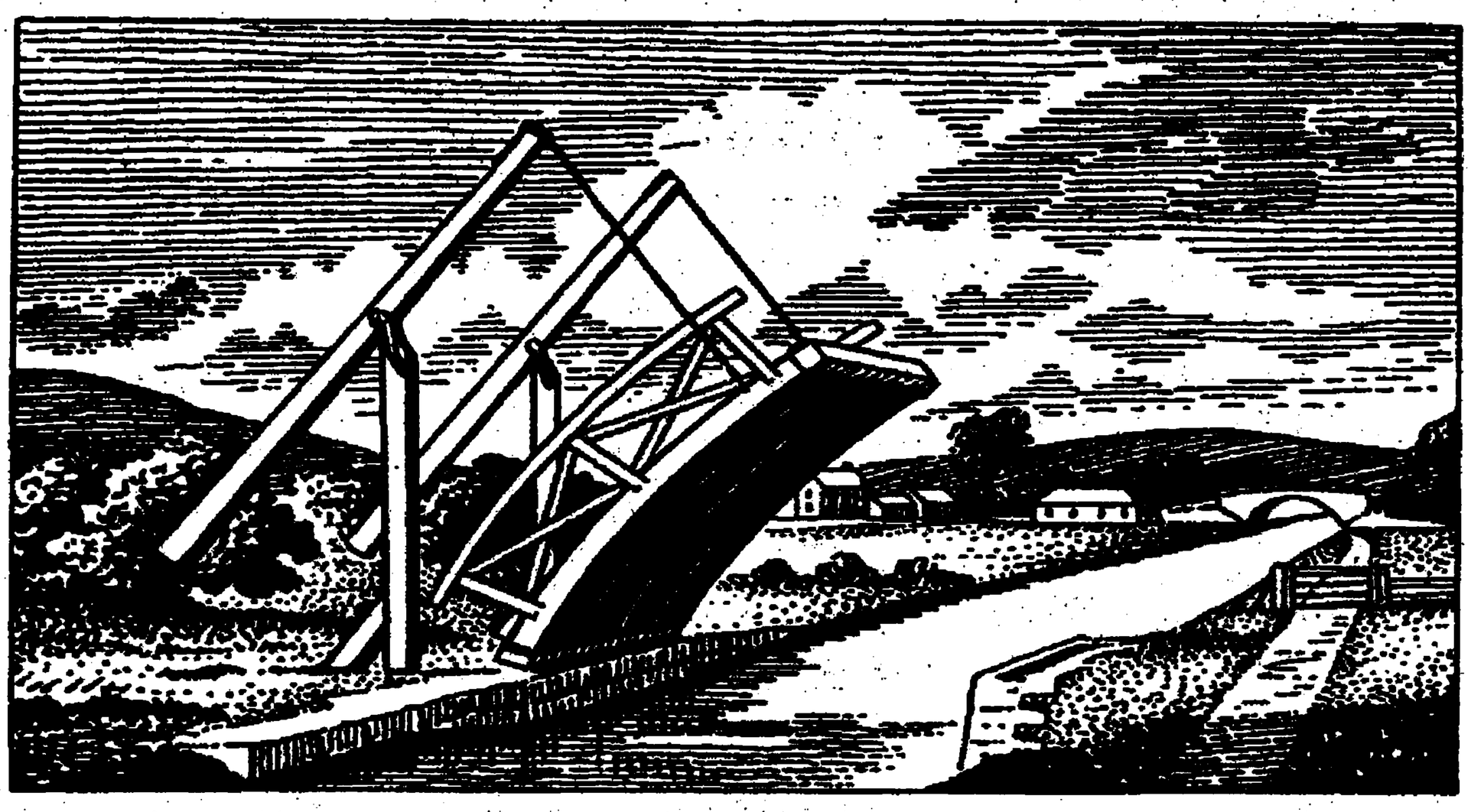


Fig. 219. Puente de servicio contrapesado para un canal. Hacia 1780.

La existencia de un cauce bastante impermeable, de profundidad y anchura uniformes, bordeado por un camino de sirga; la disponibilidad de un abastecimiento de agua en el punto más alto de los canales, y el uso de esclusas para conducir barcazas entre diferentes niveles, fueron todas, como hemos visto (p. 272), prácticas bien arraigadas en el continente europeo antes de la mitad del siglo XVIII. Tampoco representaron ninguna novedad los 72,5 kilómetros de túneles —cifra total de Gran Bretaña— construidos generalmente para evitar el costo de abrir un cauce, y en su mayor parte hechos abriendo una serie de pozos, excavando de pozo a pozo y sacando la tierra por medio de cabrias movidas por caballos. Para reducir la luz del túnel, los primeros no tenían

camino de sirga alguno, de modo que el barquero tenía que tumbarse de espaldas en la oscuridad para propulsar su barcaza dando con el pie en el techo; el túnel de Standedge, de 5 kilómetros de longitud, a través de los Peninos, construido en 1811, se pasaba aún de esta forma en 1928. Los túneles de canal posteriores tenían una estructura de madera (o hierro) construida a conveniente altura por encima del agua para sostener una senda provisional, mientras que alguno de los mayores, como el túnel de Strood en el canal del Támesis y del Medway, que tenía 8 metros de pared a pared, estaba dotado de un camino de sirga propiamente dicho. Los terraplenes no presentaban generalmente dificultades especiales, pero los acueductos, el primero de los cuales fue construido por Brindley para que el canal de Worsley cruzara el río Irwell, atrajeron poderosamente la atención por la maravilla que representaba ver el agua cruzando sobre el agua y los barcos moviéndose encima de los barcos (fig. 220). Su estructura era

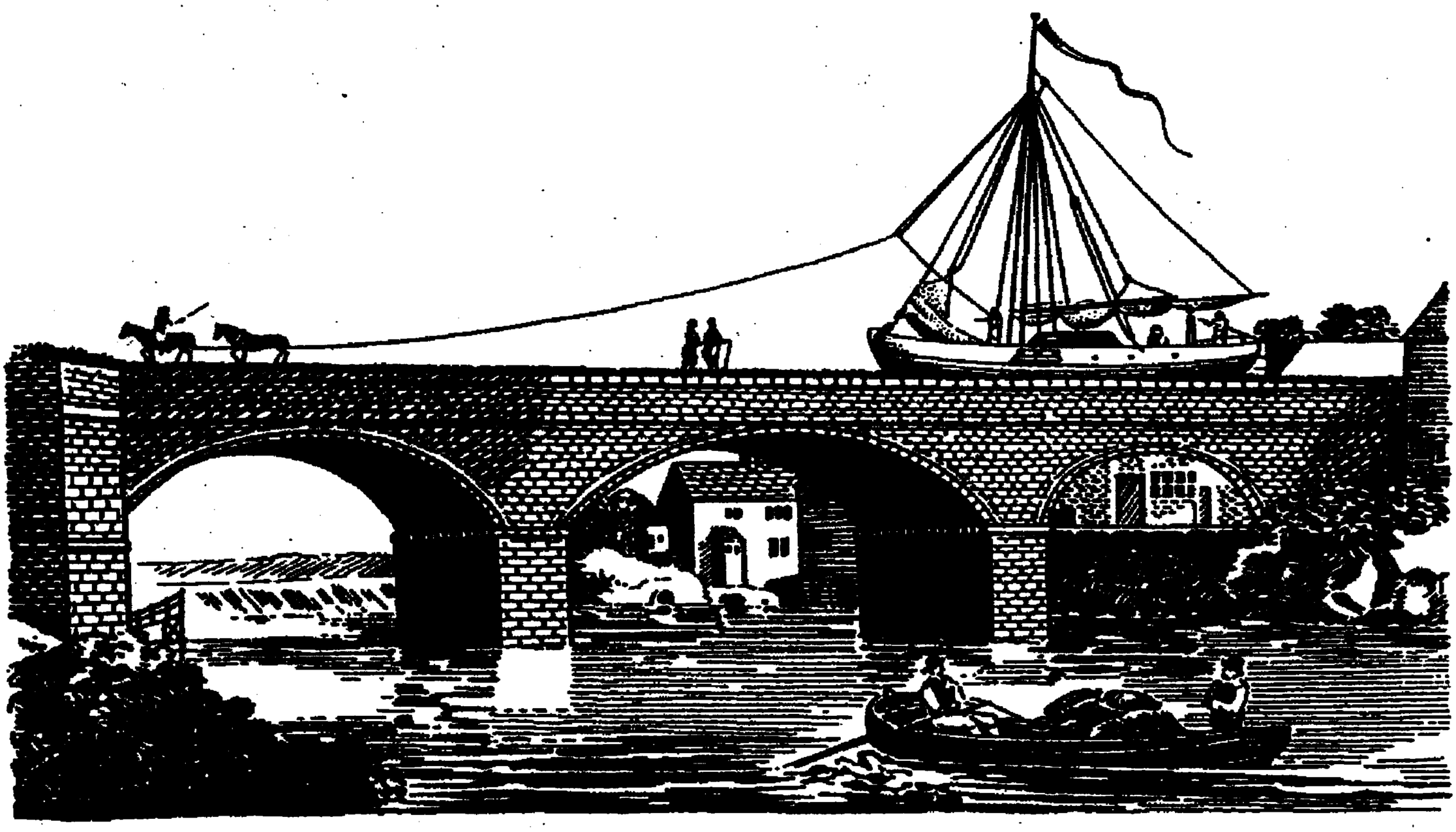


Fig. 220. El acueducto original de Brindley sobre el río Irwell.

la de un viaducto, pero más fuerte a causa del gran peso del agua, utilizándose piedra o ladrillo; el canal, de mínimas dimensiones, tenía primero un lecho de arcilla que había sido amasada a fondo para hacerla impermeable; pero al final del siglo XVIII se utilizó en vez de este tipo de cauce uno de hierro. El mayor de este último tipo fue construido por Telford en 1805 para llevar el canal de Ellesmere durante una distancia de unos 300 metros a una altura de 38 metros sobre el río Dee; el canal tenía sólo 3,5 metros de ancho, incluyendo el camino de sirga, que se construyó encima de él apoyado en soportes de hierro como en algunos de los túneles de canales.

Las esclusas, con una viga o tirante de equilibrio a la entrada, eran la mayoría de un tipo muy experimentado. Las primeras esclusas dobles, situadas una junto a la otra, se colocaron en el canal del Regente en Londres; también había esclusas de escalera con compuertas comunes, siendo la mayor una escalera de cinco esclusas en la vertiente de Yorkshire de los Peninos. Un interés especial tienen las rampas, de las cuales llegó a haber en Inglaterra un par de docenas: cuestas arriba que los barcos, generalmente pequeñas bateas, subían arrastrados, con frecuencia sobre alguna forma de carruaje de ruedas y generalmente por medio de energía hidráulica. El canal de Bude en Cornualles empleaba este sistema para elevar los barcos a una altura total de 68,5 metros, pero esto era excepcional. Por último, hubo un solo ejemplo en Inglaterra, en un canal cerca de Bridgwater, desde 1838 a 1867, de un ascensor perpendicular que conseguía elevar las barcazas a un nuevo nivel por medio de una grúa, sirviendo de contrapeso una cuba de agua. Pero hasta bien entrado el siglo XX los ascensores verticales, basados en el uso de energía eléctrica o de máquinas de combustión interna, no llegaron a ser una característica importante de los grandes sistemas de canalización en muchas partes del mundo.

En cuanto a los barcos que utilizaban los canales, la unidad normal era una sola barca, capaz de transportar una carga de hasta 20 toneladas y tirada por un caballo o un par de burros a no más de 3 kilómetros/hora; en los ríos era muy frecuente que tiraran de ellas hombres, y algunas antiguas barcas de canal llevaban velas. Hubo también un tipo especializado de barco rápido, que empleaba postas de caballos y llevaba la mitad aproximadamente de la carga —o de pasajeros— a una velocidad casi dos veces superior. Pero los primeros experimentos en los canales con barcos de vapor, como el *Charlotte Dundas* (p. 476), dieron poco fruto aparte de su uso como remolcadores en los túneles, sistema empleado en el túnel de Islington, en el canal del Regente, ya en 1826. Tanto en Gran Bretaña como en otros países el éxito de los pequeños barcos a vapor en los estuarios y en los ríos navegables no se repitió en los canales durante muchos años, tanto porque la agitación del agua tendía a destruir las orillas como porque las ruedas de paletas se estropeaban fácilmente en aguas de poco calado. El barco de hélice, implantado en 1844 en un canal belga, también resultó demasiado destructivo al principio y durante un tiempo se pensó incluso que era preferible colocar a lo largo del lecho del canal una cadena que pasaba alrededor de un cabrestante movido a vapor situado sobre un remolcador. Este modo tan indirecto de usar la propulsión a vapor, en la forma en que se empleó en Bélgica en la década de 1870, es descrito por R. L. Stevenson en su *Inland voyage*.

Mientras que en Inglaterra las principales regulaciones de ríos se terminaron antes de la era de la construcción de canales, en otros países de Europa y en América los planes de regulación de ríos fueron especialmente característicos de la primera mitad del siglo XIX. Así, el militar y estadista húngaro conde Istvan Szechenyi, veterano de las guerras napoleónicas, dirigió un estudio del conjunto del curso inferior del Danubio y trató de construir una esclu-

sa para evitar la garganta de las Puertas de Hierro. Este proyecto singular fracasó, pero se abrieron muchos cauces más allá de los rápidos y la parte superior del río fue regulada en una distancia de 232 kilómetros. Hubo también muchos intentos de regulación en otros ríos, incluidos el Rin, el Oder, el Ródano y hasta el Guadalquivir, por medio de rectificaciones y terraplenados realizados laboriosamente con pico y pala, o preparando un curso rudimentario para un nuevo canal de derivación y haciendo entrar en él toda la fuerza del río en la época de la crecida para completar la tarea, proceso que a menudo tenía resultados distintos a los previstos. Una dificultad general era que las canalizaciones aumentaban la velocidad de la corriente, haciendo impracticable con frecuencia arrastrar una carga aguas arriba. Incluso el gran Mississippi sólo podía ser remontado, aparte del uso del vapor, por barcos con quilla que eran empujados con pértigas y espiados contra la corriente por una tripulación de hasta diez hombres para un cargamento de 40 toneladas.

Las regulaciones del río San Lorenzo constituyen una gran obra del Nuevo Mundo que acaba justamente de completarse. La primera canalización con éxito se hizo en 1821, evitando los rápidos de Lachine de 14 metros a una profundidad de 1,5 metros, que tuvo que aumentarse a 2,75 metros al cabo de veinte años. Otras cuatro series de rápidos habían sido superadas anteriormente por un canal de derivación que subía más de 24 metros en 22 kilómetros, pero se necesitaron cuatro canales más cortos para completar la ruta desde Montreal al lago Ontario. Cuando se terminó con éxito esta obra en 1847, el canal de Welland, construido alrededor de las cataratas del Niágara, tenía ya casi dos décadas de existencia, y los norteamericanos estaban a punto de construir un canal que evitara el «salto» de Sault Sainte Marie, un desnivel de 6 metros a lo largo de un kilómetro y medio de río, que era el único obs-

táculo que impedía el paso desde el lago Ontario al lago Superior.

Los tres rápidos del río Ottawa fueron evitados de igual forma para unir Ottawa con Montreal, pero una empresa más arriesgada, que comenzó en 1826 el gobierno canadiense, fue una vía de agua con protección militar que corría tierra adentro desde Ottawa; esta vía requirió cuarenta y siete esclusas para atravesar la divisoria de aguas y llegar hasta el lago Ontario. Se hizo en previsión de una guerra con los Estados Unidos, que controlaban la lejana orilla del San Lorenzo: no se olvidaba que la esclusa de un canal anterior en la orilla canadiense de Sault Sainte Marie, la primera esclusa del continente americano, tenía sólo dieciséis años de existencia cuando fue destruida por las tropas norteamericanas en la guerra de 1812. De más feliz presagio fue la regulación del río Richelieu entre 1830 y 1850, que finalmente proporcionó una ruta de larga distancia a Nueva York a lo largo de la línea por la que Burgoyne había marchado al desastre de Saratoga en 1777.

Como el continente americano era suelo virgen de canales y regulaciones de ríos, parecía de esperar que los canales desempeñaran un papel más importante en su historia decimonónica que en la de Europa, pero no fue así. El canal del Erie, de 585 kilómetros, construido entre 1817 y 1824, fue verdaderamente de importancia capital porque permitía llevar el grano desde los Grandes Lagos a Nueva York, y al unir a esta ciudad con una región interior de enormes potencialidades hizo de ella por primera vez la metrópoli financiera y económica de la Unión. El canal cruzaba dos divisorias de aguas y tenía setenta y dos esclusas, pero una barcaza tirada por dos caballos podía completar el viaje de ida y vuelta en unas cuatro semanas, excepto en los meses en que el canal estaba helado; en un cuarto de siglo se hicieron necesarias esclusas dobles para hacer frente al aumento de tráfico. Otro canal importante, terminado en 1831 con la ayuda de capital holandés, fue el ca-

nal de Morris, que acarreaba carbón a lo largo de 165 kilómetros a través de la región de Nueva York. Este canal tenía un notable sistema de veintitrés rampas para salvar una subida de más de 274 metros. Al entrar en una esclusa las barcazas, que estaban construidas en dos partes y articuladas en el centro para más fácil manejo, pasaban a descansar sobre un vagón que corría sobre rieles, bajándose el peso total de 110 toneladas por gravedad y subiéndose —unos 15 metros en tres minutos y medio— por medio de un torno de izar con cable accionado por una rueda hidráulica (fig. 221). El canal de Pen-

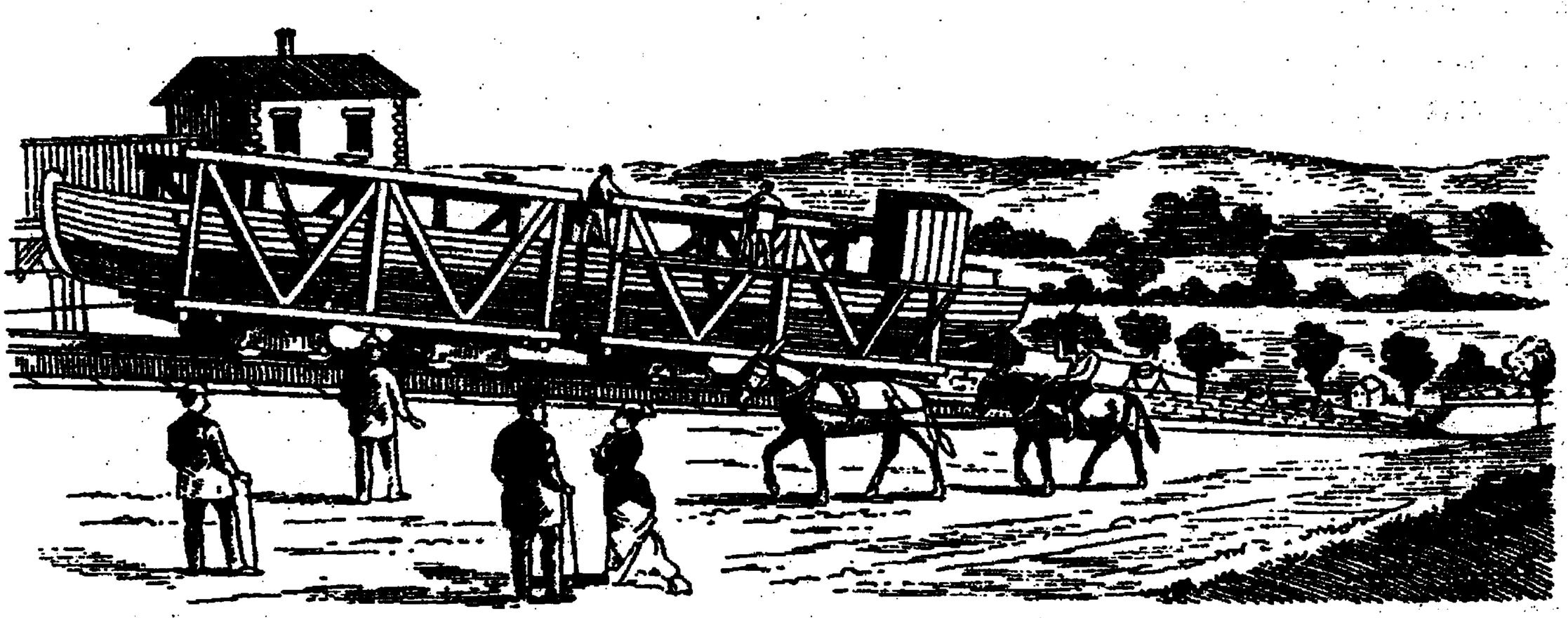


Fig. 221. Rampa en el canal Morris.

silvania, otra construcción de la década de 1820, que tenía una longitud de casi 650 kilómetros y subía a una altura de más de 610 metros, fue el otro único intento afortunado de enlazar los estados del Atlántico con el área del río Ohio, donde en 1850 sólo el estado de Ohio tenía más de 1.600 kilómetros de canales del total de 6.000 kilómetros existentes en la Unión. A pesar de tales empresas excepcionales, los canales norteamericanos en conjunto siguieron teniendo un significado comercial de ámbito local, cediendo rápidamente el paso a los ferrocarriles después de que la construcción de canales hubo sufrido

una detención temprana a causa de la crisis comercial de 1837.

En el continente europeo, en cambio, el interés y la importancia de los canales fue casi general. En Rusia, por ejemplo, el gran número de ríos navegables había llamado la atención sobre la posibilidad de enlazarlos por medio de canales ya en tiempos de Pedro el Grande. En 1760, 3.000 embarcaciones de 80 toneladas viajaban anualmente por canal entre el Neva y el Volga, y no menos de otros tres enlaces importantes se abrieron en el período 1805-11, cuando Speranski, ministro de Alejandro I, organizó un departamento de transportes. A mediados de siglo el sistema total de vías de agua interiores alcanzaba una longitud de 80.500 kilómetros y el transporte medio en barcaza era allí casi veinte veces superior al de Gran Bretaña. Una vía navegable comparable a las rusas se construyó en Suecia en 1810-32 bajo la dirección de Telford, para enlazar Estocolmo y Gotemburgo vía los grandes lagos centrales; sólo hubo que excavar 87 kilómetros de una distancia total de 580 kilómetros, pero se necesitaron 58 esclusas, abiertas principalmente en roca firme.

Más al sur, Napoleón dio un gran ímpetu a la construcción de canales. Asignó a De Prony, director de la renacida École des Ponts et Chaussées, tareas que iban desde la construcción del canal de Ourcq a la desecación de las Marismas Pontinas. En aquella época se hizo el canal de Pavía, que servía para el riego y la navegación, y hubo mucha actividad en este sentido en los Países Bajos: en 1810 fue abierto el gran canal de San Quintín, que incluía dos túneles, para enlazar esa región con los ríos Somme, Oise y Sena, dando acceso tanto a París como a puertos del canal de la Mancha tan alejados como El Havre. La obra del régimen napoleónico fue continuada por sus dos sucesores, alcanzando un punto culminante en el reinado de Luis Felipe (1830-1848), durante el cual se duplicó virtualmente la longitud de los canales franceses: tanto el Marne como el Ródano fue-

ron enlazados con el Rin, y se construyeron varios canales laterales, paralelos a ríos que representaban dificultades para la navegación. En la segunda mitad del siglo Francia hizo mucho más que Inglaterra para unificar las dimensiones de sus canales, que conservaron mucha de su importancia, especialmente cerca de las regiones carboníferas y de la frontera belga.

También los Países Bajos continuaron siendo una de las grandes zonas canalizadas del mundo mucho tiempo después de Napoleón, como lo habían sido mucho antes. En el período inmediatamente posterior a 1815 se construyó una serie entera de canales al este y al oeste de las regiones carboníferas del área de Mons y Charleroi. Una segunda serie importante enlazaba puertos del interior con el mar, de modo que una ruta fluvial canalizada por primera vez en 1722 continuaba siendo a mediados del siglo XIX el camino por el cual las goletas británicas llevaban sal de Mersey desde Ostente hasta Brujas, mientras en Gante, en 1827, se construía un nuevo canal navegable, siguiendo uno anterior del siglo XVI, hasta el estuario del Escalda. Un tercer canal navegable de 80 km de longitud, con una profundidad mínima de 5,5 m, fue construido para mejorar el acceso a Amsterdam, mejorando las aguas poco profundas del Zuiderzee. Más tarde la antigua conexión entre los canales de transporte y las obras de desecación y riego fue resucitada con la construcción del canal navegable del mar del Norte, pues éste fue un paso importante en la recuperación al mar de los terrenos del Zuiderzee, proyectada hacia 1840 y terminada finalmente en nuestra propia generación.

La longitud total de los canales alemanes nunca llegó a mucho más que la mitad de la de los franceses, siendo su principal finalidad proporcionar conexiones con el Rin y el Elba, los dos ríos que entre sí llevaban la mayor parte del comercio transportado por agua del país. Pero a los canales alemanes se les dieron las mismas dimensiones que a las regula-

ciones de los ríos. El Ems, por ejemplo, en 1877, no podía llevar ningún cargamento que excediera de 80 toneladas: al final del siglo no sólo podían pasar a lo largo del río, canalizado en 88,5 km, cargamentos de 600 toneladas, sino también a lo largo de los 151 kilómetros del nuevo canal Dortmund-Ems; éste tenía un elevador de 14 m en un depósito de 68 × 8,5 metros, con cabida para 2,5 m de agua. El Imperio alemán construyó también el primer canal navegable moderno de importancia internacional, el canal de Kiel, que en 1914 transportaba 10 millones de toneladas al año de buques bálticos. Tuvo un precedente a pequeña escala en el canal del Eider, por el cual Cristián VII de Dinamarca unió en 1784 el ángulo sudoccidental del Báltico en Kiel, Schleswig, con las aguas superiores del río Eider, que desemboca en el mar del Norte, justo al norte de la ensenada de Heligoland. Ciento diez años más tarde, después de haber pasado Schleswig-Holstein de manos danesas a manos prusianas, se hizo el canal de Kiel, mucho más ancho y profundo, con un curso de 95 km hasta el estuario del Elba. Estos dos canales ahorraban a los barcos el paso, largo y bastante peligroso, alrededor del cabo Skagen; su construcción fue relativamente fácil, por la llanura del país y la disponibilidad de agua del Eider.

El canal de Suez fue una empresa de mucha mayor escala, con sus 148 km de longitud, 8 m de profundidad —aumentada más tarde— y 22 m de anchura, equipado con muelles, vías de servicio y un sistema de señales. Aunque los beneficios que tal canal ofrecía al comercio europeo con el Oriente Lejano y con Australasia parecen ahora incuestionables —su influencia en la promoción del uso de los buques de vapor ha sido mencionada ya (p. 542)—, su construcción fue grandemente obstaculizada por la oposición británica, dado que podía crear dificultades para la estrategia naval. Lo empezó una compañía francesa, bajo la dirección de Ferdinand de Lesseps, en 1859, pero hasta 1866 no fue recompensada su tenacidad

con la aprobación final del sultán turco para la excavación final como «uno de los más deseables acontecimientos en esta era de la ciencia y del progreso». Aparte de los extensos trabajos portuarios que hubo que realizar en Port Said y de la extracción de algunos bancos de roca, uno de los cuales, en Shaluf, requirió el empleo especial de 1.500 obreros piamonteses, la principal tarea fue la excavación de tierra. En total fueron extraídos unos 75.000.000 de m^3, muchos de ellos a mano, por los fellahin —aunque los trabajos forzados fueron prohibidos por el sultán en 1863—, pero la mayoría por medio de dragas. El

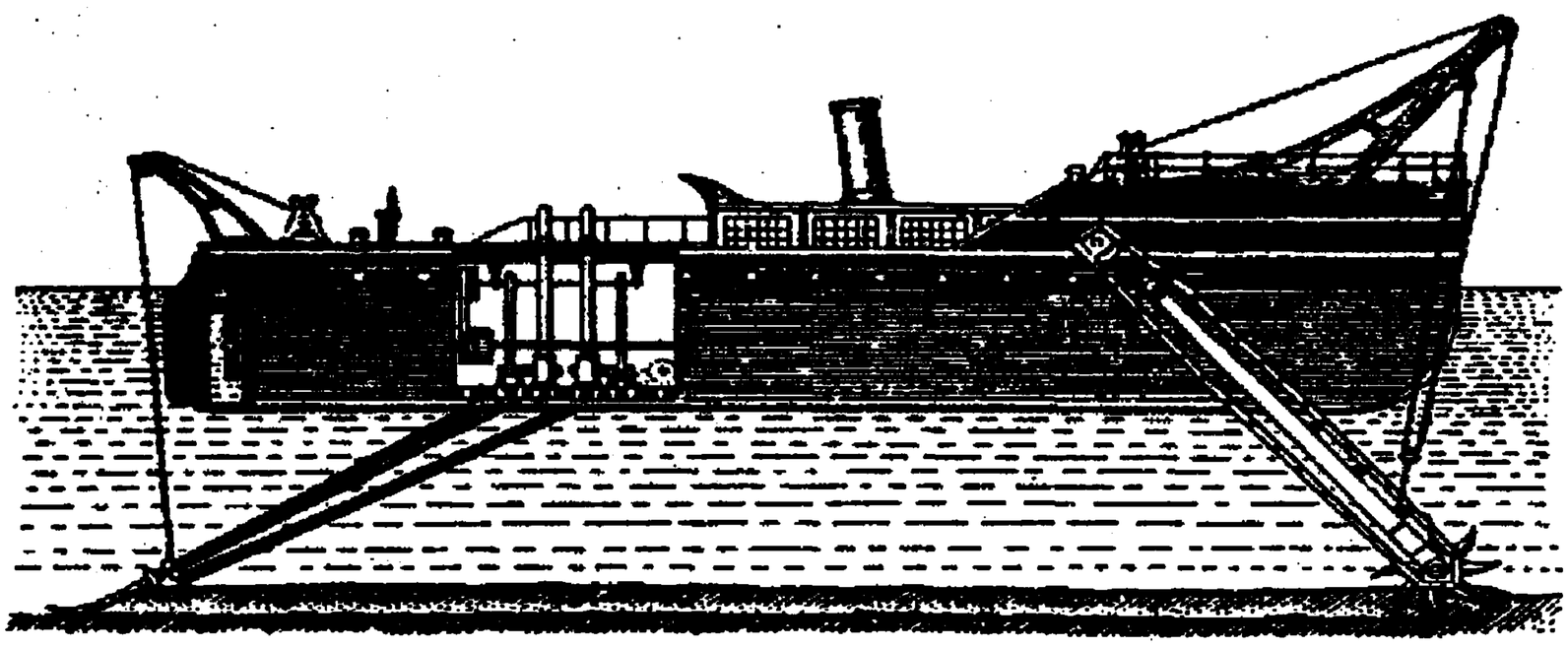


Fig. 222. Bomba francesa para extraer arena movediza por vapor. De un modelo. Hacia 1865.

contratista francés Lavalley ideó un tipo de draga-gánguil, que depositaba el cieno por medio de largas paletas, que alcanzaban bastante más allá de las orillas del canal; se inventó una bomba flotante para extraer arena, con objeto de profundizar el cauce del canal disgregando y succionando (fig. 222); y se utilizaron arietes hidráulicos de punta afilada para poder quebrantar la roca y demás materiales duros en pedazos de tamaño adecuado para ser recogidos por las dragas de cangilones movidas a vapor. En 1867 sesenta dragas, incluidas veintidós largas dragas-gánguiles, extrajeron 1.585.000 m^3 de tierra al mes, que era cuatro veces más de lo que hacían 7.500 obreros.

El canal de Suez prosperó continuamente desde el tiempo de su apertura en noviembre de 1869; en

1879 se utilizaba ya la nueva ruta para transportar tres millones de toneladas al año, que en 1901 llegaron a los 11 millones de toneladas. De Lesseps se animó por ello a intentar lo que parecía un proyecto igualmente factible de canal a nivel del mar a través del istmo de Panamá. Fracasó, y murió en desgracia; el canal de esclusas americano, construido bajo condiciones políticas, financieras e higiénicas completamente distintas, se terminó en 1914.

LOS FERROCARRILES: EL TENDIDO DE VIAS

En cuanto al tendido de vías, los problemas de los ingenieros de ferrocarriles fueron en algunos aspectos los mismos que ya habían sido abordados para los canales. En los dos casos la extracción de enormes cantidades de tierra, con un inmenso empleo del trabajo manual, entonces barato, fue el proceso clave (fig. 223). Los primeros ferrocarriles, al igual que

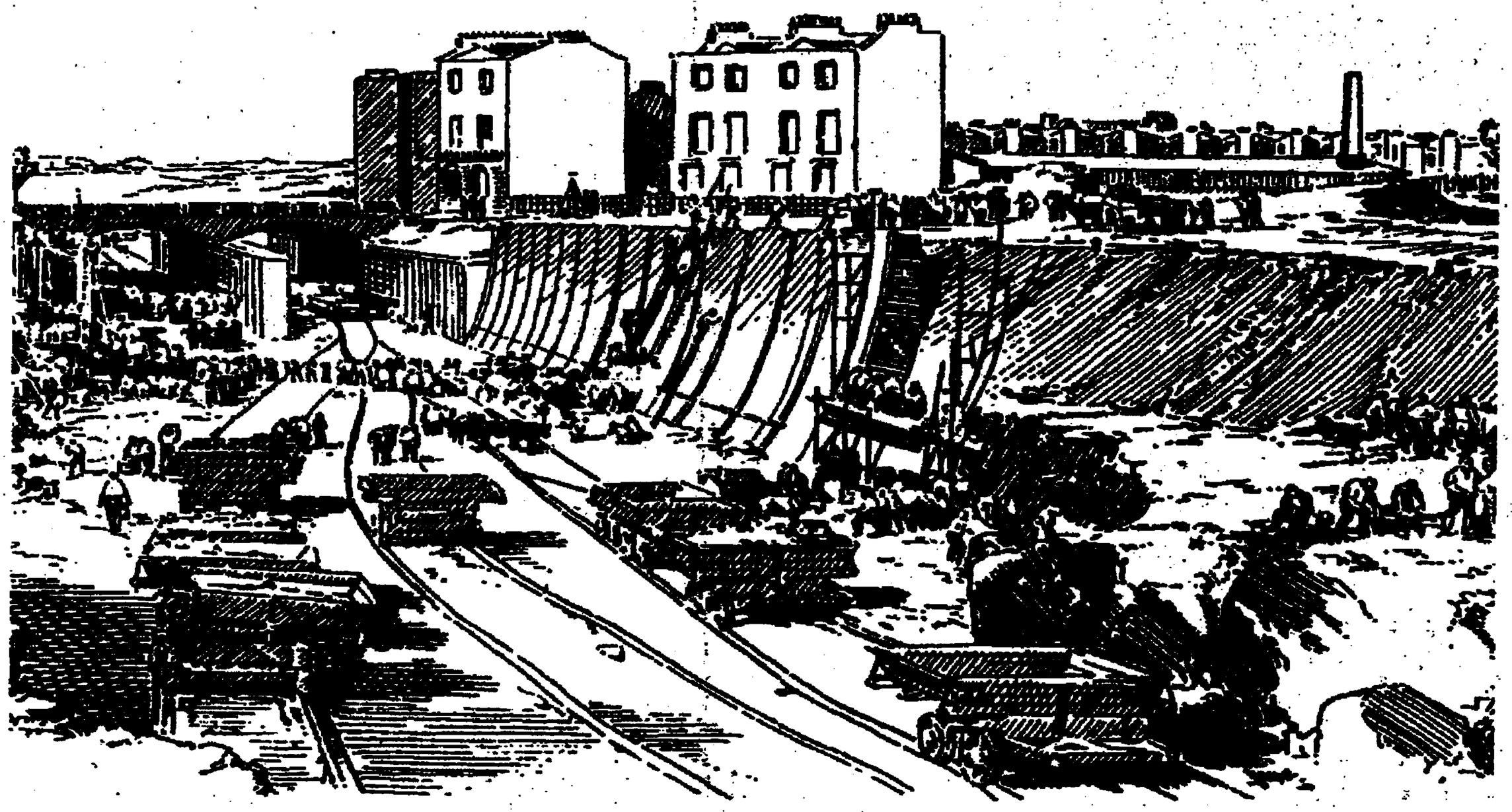


Fig. 223. Construcción de un muro de contención en la estación Camden Town, Londres, 1837.

los primeros canales ingleses, se planearon siguiendo la ruta más llana posible, pues las locomotoras primitivas no podían subir pendientes fuertes (p. 553). Así la ruta Londres-Birmingham, inaugurada en 1838, y el tramo Londres-Swindon del Gran Ferrocarril del Oeste a Bristol, cuyo plano había levantado Brunel en 1833 en menos de un mes, eran casi llanas. Pero los ferrocarriles posteriores de todas las partes del mundo seguían recorridos rectos, en vez de rodear cualquier obstáculo, excepto los más indomables. Como la velocidad aumentó, la seguridad imponía que las curvas fueran menos cerradas: en Inglaterra el radio mínimo aprobado era de 1,5 km, incluso con una curva más suave de transición en cada extremo. Cuando los ferrocarriles recurrían a marchar en zigzags o en espiral, lo hacían para salvar barreras como los Alpes —atravesados por primera vez por la línea Viena-Trieste en 1853—, donde ni siquiera se había tenido nunca la intención de realizar una obra de canalización. El resultado, por ello, fue un gasto sumamente mayor en puentes y túneles (páginas 659, 665).

Aun en terreno llano podía ser difícil a veces proporcionar una base suficientemente firme como para soportar el peso de un tren a plena carga. El ferrocarril de Liverpool o Manchester, por ejemplo, sólo pudo cruzar Chat Moss por el expediente de embutir en la tierra enormes haces de leña, sobre los que se volcaban cargas de piedra y tierra. En algunos casos parecidos, más tarde, se hizo necesario utilizar enormes pilotes de madera u hormigón. En muchas zonas húmedas se necesitaron trabajos especiales de desecación para preservar la línea, y en situaciones particularmente comprometidas hubo que protegerla de ventisqueros y desprendimientos de tierras con abrigos y túneles.

En general, sin embargo, aparte de puentes y túneles, lo que se construía principalmente eran zanjas y terraplenes, éstos, siempre que era posible, con la tierra excavada en aquéllas. La anchura de la obra

estaba determinada en primer lugar por el número de vías y su ancho; incluso las líneas principales eran a menudo de una sola vía, porque atravesaban vastas zonas escasamente pobladas, como el ferrocarril transiberiano, que fue comenzado en la década de 1890, o porque las dificultades naturales hacían la vía inevitablemente costosa, como fue el caso de uno de sus más pequeños y contemporáneos, el ferrocarril de Bergen, que sube a 1.200 m en las montañas noruegas. Este fue también un factor en la llamada «batalla de los anchos de vía» en la historia ferroviaria inglesa; si el ancho de 2.134 mm de Brunel hubiera sido aprobado por el Parlamento en 1848 en vez del actual ancho normal de 1.435 mm, los gastos de instalación de las principales líneas británicas habrían sido sustancialmente mayores. Pero la anchura total de las zanjas y los terraplenes dependía de un factor adicional, el ángulo del talud, es decir, la pendiente en la que el terreno por encima o por debajo del ferrocarril quedaría firme. Para los terraplenes se elaboraron normas estructurales que tenían en cuenta el tipo de material. En una zanja un paramento de roca podía dejarse normalmente muy inclinado, pero no un paramento de tierra y piedras, a menos que se estimara que valía la pena añadir un muro de contención de piedra o ladrillo.

Disponemos de cifras precisas de la obra que hubo que realizar para construir la última de las principales líneas británicas, el Gran Ferrocarril Central, una ruta alternativa al norte, cuya estación terminal de St. Marylebone se inauguró en 1899. Para construir 170 km de doble vía hubo que excavar 10.500.000 m^3 de tierra y roca. Se colocaron unos 500.000 m^3 de fábrica de ladrillo, junto con 168.000 m^3 de hormigón y 7.000 m^3 de sillería. La cantidad de balasto colocado ascendió a más de 760.000 m^3. Esta obra se hizo principalmente en la llanura de Midland: puede compararse por eso con la primera etapa del ferrocarril de Bergen, en Noruega, de vía única y 108 km de recorrido, terminada en Voss en

1833, para la cual hubo que volar más de 760.000 m^3 de roca.

La excavadora de vapor empezó a ser utilizada en la construcción del primer ferrocarril del Pacífico, en Norteamérica, en la década de 1830; la machacadora de piedra, en Norteamérica, en 1858, donde se utilizó primero para carreteras (p. 635); la maquinaria de tendido de vías y las grúas para bajar los carriles desde los trenes de construcción, que avanzaban hasta el último tramo de carril tendido, fueron introducidas allí aproximadamente una década más tarde. Pero una gran parte del trabajo tenía que hacerse todavía con pico, pala y carretilla. La base tenía que ser acondicionada con un ligero peralte e ir provista de algún que otro canal de desagüe para el agua de lluvia, y también había que preparar una superficie conveniente para el balasto; éste, de piedra machacada o escoria de hierro, era depositado luego en dos capas, de forma que facilitaran al máximo el drenaje y la estabilidad; y finalmente cada traviesa de madera —la «*dormant timber*» (madera durmiente), como se llamaba entonces— requería ser cuidadosamente encajada. En general, la principal reducción en el trabajo manual se produjo por el uso creciente de una instalación provisional de carriles para vagones basculantes, que operaban entre las zanjas y los terraplenes, permitiendo transportar por la vía casi hasta su posición final la tierra sacada de las unas a los otros. Pero la tarea final de colocar la vía se hizo más exhaustiva cuando el peso y la velocidad crecientes del tráfico exigieron el uso de carriles más pesados (p. 555).

LOS PUENTES

Las construcciones de grandes puentes son menos repetitivas que la mayoría de las formas de edificación, porque los problemas que presenta la interrelación de tierra y agua en cada lugar varían casi

hasta el infinito. Los puentes representan también una prueba más difícil de la habilidad de los constructores: baste recordar la conocida historia del desastre del puente ferroviario del Tay en diciembre de 1879, en el que perecieron setenta y tres personas por el hundimiento del puente más largo del mundo, que no hacía dieciocho meses que se había levantado. Por otra parte, los grandes puentes desempeñaron un papel especial en el desarrollo de Europa y América durante este período, al embellecer las grandes ciudades, viejas y nuevas, al hacer posible la construcción de nuevas carreteras, y aún más al permitir que los ferrocarriles siguieran un curso recto a través de valles y ríos, e incluso en los más estrechos brazos de mar. Los constructores de puentes merecen por ello nuestra atención.

El primer gran nombre en la construcción de puentes del siglo XVIII es el de Perronet (p. 587), que enseñó a los ingenieros a hacer los arcos menos altos —ya que la poca pendiente es de gran ayuda para los vehículos rodados—, de modo que la clave subiera sólo un doceavo de la luz encima del arranque, y los pilares más estrechos, hasta que llegaron a ser sólo de un décimo de la luz. Tales puentes eran elegantes y apropiados siempre que quedaron dentro de los límites de seguridad. La última de las obras de Perronet fue un puente en París, llamado originalmente Puente de Luis XVI, cuya calzada corría a nivel de los muelles mientras sus esbeltos pilares reducían la obstrucción de la vía de agua a un tercio, a diferencia de los dos tercios de algunos de los grandes puentes romanos. Empezado dos años antes de la Revolución, se acabó con piedra de las ruinas de la Bastilla, y tuvo entre sus primeros usuarios a las turbas que se reunieron para asistir a la ejecución de Luis XVI en la cercana Place de la Concorde, de la que el puente toma ahora su nombre. Las cimbras de madera provisionales sobre las que Perronet levantaba sus arcos estaban hechas de piezas atornilladas, que llevaban el empuje a los pilares per-

manentes, y cuando se quitaban los tornillos toda la estructura provisional se desplomaba en el río tirando de unas cuerdas. Una cimbra perfeccionada, que utilizaba múltiples cuñas, de modo que podía descimbrarse poco a poco probando mientras la estructura permanente y reduciendo así el peligro de catástrofe si la debilidad se hacía aparente, fue introducida por un escocés, Robert Mylne —el último arquitecto británico importante, que fue también ingeniero civil—, cuando empezó la construcción del puente de Blackfriars, Londres, en 1760 (fig. 224).

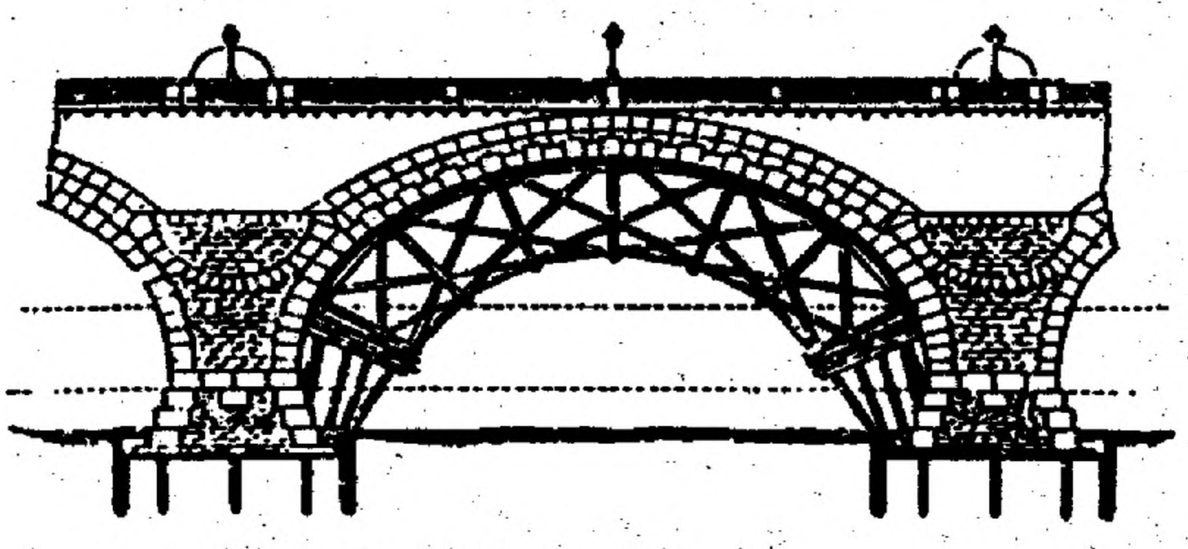


Fig. 224. Puente de Mylne sobre el Támesis, en Blackfriars, mostrando la cimbra aún puesta.

Este fue el primer puente británico con un arco elíptico; otras características interesantes eran que los cajones de cimentación descansaban sobre pilotes y que se utilizaba un arco invertido más bien rudimentario para transmitir el empuje de las nueve luces, la mayor de las cuales tenía 30 m.

Tres famosos puentes de mampostería fueron planeados para Londres por John Rennie —quien junto con Telford estableció en Inglaterra el sistema de contratos globales para todas las obras requeridas en un proyecto de ingeniería— en el período siguiente a las guerras napoleónicas. El primer puente de Waterloo, que introdujo en Londres el granito en la construcción de puentes, y del que el escultor Canova dijo que «era digno de un viaje desde Roma para verlo», fue terminado por él en 1817; sus hijos terminaron el nuevo Puente de Londres (después ensanchado) en 1831, diez años después de la muerte del diseñador. Su mayor luz (46,5 m) fue la primera en sobrepasar, aunque sólo por 3,8 m, la de Pont-y-ty-

Pridd, sobre el rápido Taff, en Glamorganshire, que un albañil local había construido, sin conocimientos especiales, al cuarto intento, en 1756. Rennie aplicó el sistema de Mylne de poner cimbras a los puentes y su uso del arco invertido, pero en lugar de cajones de aire comprimido él cimentaba sus puentes sobre pilotes construidos dentro de ataguías: por entonces la máquina de vapor había sido adaptada tanto para mover el martinete mecánico para hincar pilotes como para los mecanismos de tracción. Pero fue el tercero y más famoso puente de Rennie en Soughwark el que introdujo en Londres el hierro colado como nuevo material estructural.

En 1779, Abraham Darby, de Coalbrookdale, el propietario en tercera generación de la famosa fundición de hierro (p. 214), diseñó, fundió, levantó y costeó en gran medida un puente de hierro casi semicircular, que permitía el acceso de sus obreros y vehículos a la orilla más alejada del Severn (fig. 225). Los nervios principales, de 21 m de longitud, fueron fundidos en moldes de arena al descubierto, directamente desde un alto horno; las partes, que pesaban en total 378,5 ton, fueron subidas, montadas y aseguradas por medio de cuñas sin un solo tornillo o remache. Aunque el hierro colado no se había usado nunca estructuralmente a esta escala, la obra de hierro (aunque no los accesos de mampostería) han resistido la prueba del tiempo: el puente lo usan todavía los peatones.

Fig. 225. El puente de hierro sobre el Severn, en Coalbrookdale. De una medalla comercial.

La hazaña suscitó el interés general. Tom Paine, por ejemplo, celebró el triunfo de la Revolución americana diseñando un puente de hierro con trece nervios, uno por cada Estado de la nueva república, que debía fundirse en Inglaterra para levantarlo en Pensilvania: se hizo un modelo, que fue exhibido en Londres en 1791, pero el puente no llegó a levantarse. El segundo puente de hierro fue construido por Telford un poco más arriba en el Severn para sustituir a uno que se había llevado una inundación en 1795, y aproximadamente al mismo tiempo uno mucho más ambicioso, con una luz de 71 m, cruzaba el río Wear en Sunderland. En la estructura de éste, sin embargo, el uso de sólidos nervios de hierro unidos en el coronamiento del puente fue sustituido por nervios montados sobre una cimbra de madera con dovelas de celosía de hierro colado y estribos de hierro forjado. Rowland Burdon, miembro del Parlamento por Sunderland y director de la fundición de hierro de Rotherham, que construyó el puente, sacó una patente para este tipo de construcción. Pero cuando Telford propuso dos años después construir un Puente de Londres de hierro colado (fig. 226)

Fig. 226. El ambicioso y no realizado proyecto de Telford para un nuevo Puente de Londres, 1797.

con una luz de 180 m, un comité de la Cámara de los Comunes, incapaz de obtener una seguridad sobre la resistencia del hierro colado a partir de una multitud de testimonios contradictorios de expertos, desechó el proyecto. Rennie, sin embargo, suministró una buena prueba de dicha resistencia al construir

el puente de Southwark. Este se terminó en 1819, y duró un siglo, poco más o menos; la luz central era de 73 m, con luces laterales más pequeñas; la firma de Rotherham arriba citada hizo tanto los nervios segmentales de hierro como las trece dovelas que forman cada arco.

En Pensilvania, en 1800, fue construido por James Finley un puente colgante, pero de su género, suspendido con cadenas de hierro de barras verticales; y la dificultad de hacer grandes piezas de hierro fundido en Norteamérica durante los primeros años del siglo dio a los puentes colgantes de hierro una boga considerable. En Inglaterra los primeros fueron construidos para los turbulentos ríos escoceses. Para prescindir de los pilares de mampostería que soportan los arcos en medio de la corriente y están expuestos a ser socavados por las crecidas, fueron patentadas por (Sir) Samuel Brown las cadenas de suspensión de hierro forjado, formadas por eslabones articulados; Brown fue el diseñador de dos importantes puentes colgantes sobre el Tweed, aunque uno en Berwick, con una luz de 137 m, fue derribado a los seis meses. Sus eslabones fueron adoptados, sin embargo, por Telford para el gran puente por el que la carretera de Holyhead atravesaba el estrecho de Menai sobre cadenas de 177 m de longitud. El tablero original de madera resultó demasiado ligero, y fue destruido por una tormenta en 1839, sólo trece años después de su terminación, pero aunque a veces oscilaba hasta cerca de 5 m, el mismo puente, con sus cadenas de hierro originales, soportó el tráfico rodado de Anglesey sin ser reconstruido hasta 1939. La suspensión mediante cable fue utilizada por primera vez para un puente vial construido por Marc Seguin cerca de Lyons en 1825. A los diez años un socio de Seguin consiguió una luz de 265 m en Suiza, empleando un cable hecho con 1.000 alambres trenzados, envueltos a su vez en alambre; pero fue superado a su vez por Charles Ellet, el «Brunel de América», cuyo puente de cables sobre el Ohio en

1848 fue el primero del mundo en tener una luz de más de 300 m. Pero el hecho de que resultara seriamente dañado por un tornado sólo seis años después y de que Ellet perdiera al menos otros dos puentes por deformación no contrarrestada, sirvió para recordar la peligrosa debilidad de esta forma de puente, a menos que se usaran vigas o tirantes para reforzarlo, privando así a la estructura de la ligereza y la baratura que contaban sus méritos. Por eso Robert Stephenson rechazó el puente colgante para el ferrocarril, y cuando I. K. Brunel lo utilizó en 1852 en Chepstow, donde hubo que tener en cuenta tanto las necesidades de la navegación como la altura de la marea de 12 m del Wye, colocó cordones superiores tubulares de hierro forjado de 2,7 m de diámetro y sostuvo cada una de las dos vías del ferrocarril sobre un par de vigas de hierro forjado.

Mientras tanto, los puentes de vigas de celosía, cuyo primer diseño conocido fue publicado por Palladio en 1570, habían progresado mucho en Norteamérica, donde el arquitecto Ithiel Town obtuvo en 1820 una patente de un modelo en forma de rombo con tablones y pilares de madera, techado y revestido con tablas solapadas; como este puente podía ser levantado por los carpinteros con materiales locales, los derechos por el uso de la patente a no menos de un dólar por pie lineal le produjeron una considerable fortuna. Los primeros puentes de ferrocarril americanos eran de esta clase, a semejanza de los baratos viaductos de caballetes de madera, largo tiempo empleados en la construcción inglesa de ferrocarriles en distritos como Cornualles, donde el tráfico era ligero. En la década de 1840 T. W. Pratt y otros ingenieros americanos diseñaron vigas de celosía compuestas perfeccionadas, utilizando madera y hierro forjado, y hasta 1873 no patentó Pratt una viga de celosía de madera y acero.

Pero en Inglaterra, donde la madera era relativamente escasa y el hierro colado abundante, durante algún tiempo se construyeron puentes de ferrocarril

de hierro colado, de los cuales el más notable —aunque incluye algo de hierro forjado— fue el levantado por Robert Stephenson en 1849 en Newcastle upon Tyne. El ferrocarril va justo por encima del nivel de la clave de los seis arcos atirantados, y hay un camino al nivel del tirante; a ambos niveles el puente aún cubre las necesidades del tráfico moderno. A la solidez de la construcción contribuyó el hecho de que al final de la era del hierro colado, como podemos llamarla, la colocación de los cimientos de puentes había sido muy perfeccionada. Stephenson pudo hincar los pilotes con un martillo-pilón o ariete hidráulico de vapor de Nasmyth que daba un golpe por segundo; Brunel pudo construir en Chepstow una torre de hierro colado sobre el cauce del río, para aguantar un extremo de las cadenas de suspensión, con el uso de cajones de aire comprimido.

Tales cajones fueron introducidos por primera vez para construir cimientos en terreno pantanoso por el polifacético Sir Thomas Cochrane (más tarde décimo conde de Dundonald) en 1830. La esencia del sistema consistía en bombear aire comprimido dentro de una cámara de trabajo en el fondo de un cajón neumático, aumentándose la presión para que correspondiera a la del agua exterior cuando el filo de hierro o acero alcanzaba mayores profundidades. Los obreros y la tierra que extraían del cauce del río eran sacados a través de una esclusa de aire que había en el techo de la cámara de trabajo. Cuando el cajón se hundía las paredes laterales se extendían hacia arriba, sección por sección, manteniendo así siempre la parte superior por encima del nivel del agua: en efecto, los cimientos se construían de arriba abajo. Aunque Brunel utilizó cajones en escala considerable para el puente Royal Albert (p. 662), fue la construcción de puentes sobre el Rin en Kehl por Fleur Saint-Denis en el mismo año (1859) la que consolidó plenamente el sistema, en el sentido de que la mampostería final se colocaba directamente sobre la parte superior del cajón. El hecho de que el uso de aire comprimido

diera origen a la penosa y a menudo fatal «enfermedad del cajón» o aerombolismo supuso una grave complicación. Si el proceso de descompresión para los hombres que emergían a través de la esclusa de aire desde grandes profundidades no era suficientemente gradual, se liberaban burbujas de nitrógeno en los tejidos, alteración fisiológica con que se enfrentaban también los buzos de las profundidades del mar, que no fue enteramente entendida y efectivamente prevenida hasta después de acabar el siglo.

El puente de Britannia de Robert Stephenson, por el que el ferrocarril atraviesa el estrecho de Menai en un punto situado a unos pocos cientos de kilómetros al sudoeste del elegido por Telford, donde el canal es mucho más ancho, pero está dividido por la roca de Britannia, era mucho más notable que su vecino. La característica principal fue el uso de pares de enormes tubos rectangulares de hierro forjado, diseñados después de una cuidadosa comprobación en asociación con Fairbairn, constructor de barcos, y Eaton Hodgkinson, miembro de la Royal Society, que había hecho un estudio especial de la resistencia de materiales. Su luz sobre el agua era de 140 m, y no había precedentes en hierro forjado de una luz que excediera de 9,6 m. Los tubos estaban formados por planchas de hierro forjado, remachadas como las que se hacían para calderas y construcción naval: de la forma cerrada de tubo, que era innecesariamente pesada y almacenaba humos nocivos, se prescindió pronto en puentes posteriores, pero el material fue adoptado para innumerables puentes de vigas rectas. El puente de Britannia también supuso una novedad sensacional por su modo de terminación. Se habían levantado pesadas torres, que recordaban la arquitectura maciza del antiguo Egipto, para sostener las cadenas de suspensión, pero Stephenson halló excesivo el coste de éstas, y al final los tubos fueron puestos a flote sobre pontones (fig. 227) y elevados a su posición por gatos hidráulicos instalados cerca de lo alto de las torres.

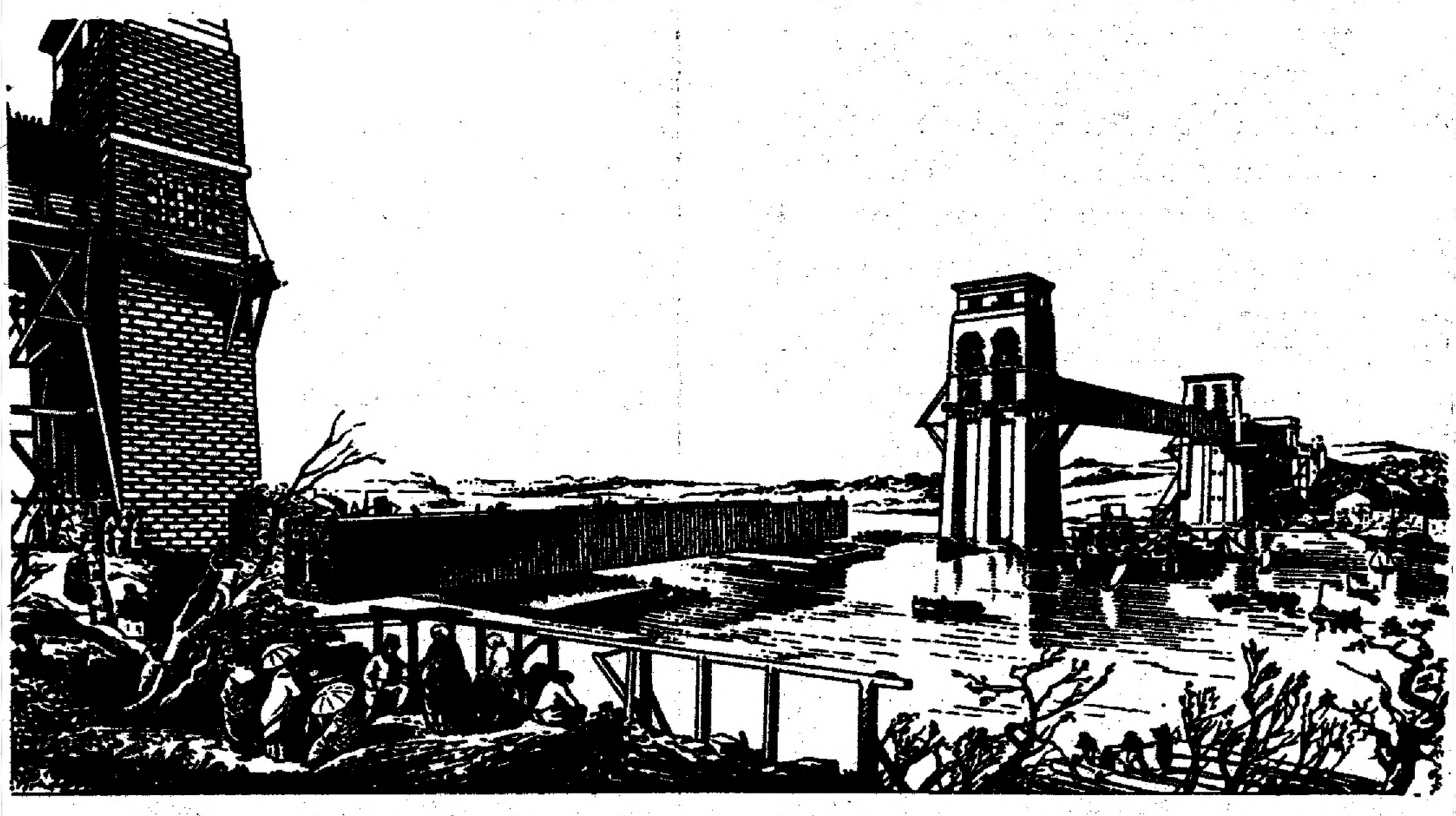


Fig. 227. Uno de los tubos de 140 m. del puente de Britannia puesto a flote en su posición antes de ser elevado, 1849.

A pesar del triunfo de Stephenson y del uso con éxito de tubos ovales, de 5 m de longitud por 3,5 m de diámetro, para el puente Royal Albert de I. K. Brunel sobre el Tamar (1859), por el que el ferrocarril de Cornualles pasa por encima del nivel de crecida a la misma altura (30 m) que el de Stephenson, el futuro de la construcción de puentes de gran luz estaba en el sistema de suspensión. Esto es algo notable, porque hasta bien avanzado el siglo XX no se dio una explicación teórica plenamente satisfactoria de por qué las continuas vibraciones del viento, e incluso del tráfico, pueden producir oscilaciones potencialmente destructivas. El ingeniero de hoy día puede proyectar luces de hasta 3.000 m; pero Inglaterra, con sus pequeñas distancias, tenía relativamente poca necesidad de ellas, y la culminación de la construcción de puentes colgantes en el siglo XIX se alcanzó con el puente sobre la garganta del Avon,

en Clifton, en 1862. El diseño era de I. K. Brunel, aunque se terminó después de su muerte, y en él se usaron las enormes cadenas de hierro forjado hechas veinte años atrás para su puente de Hungerford, sobre el Támesis, en Londres, que había sido desmontado para hacer sitio a la estación de Charing Cross.

Pero los avances más importantes en técnica los hizo John A. Roebling, un inmigrante alemán de la primera época en Norteamérica, con una forma de cable de alambre que patentó en 1841: a diferencia de los cables metálicos trenzados utilizados antes (p. 658), en los que el alambre se debilitaba por el retorcimiento, éste se hacía con alambres paralelos, colocados separadamente, y luego atados a su vez con alambre. Se utilizó por vez primera en gran escala en 1855 para el puente del Grand Trunk, en Niágara, que servía para que un ferrocarril de vía única atravesara una carretera, y —lo que era más importante— sostenía la carga del carril con un éxito sin precedentes. Se colocaron vigas de rigidez en el tablero (método que se utilizó también para impedir el movimiento del puente de Clifton), y fue reforzado luego contra la acción del viento por tirantes de cable metálico encima y debajo del tablero. El peso lo soportaban cuatro cables principales, que tenían un diámetro de 250 mm después de atados. El mismo método empleó Roebling para el puente de Brooklyn, en Nueva York —que fue terminado en 1883 por su hijo, W. A. Roebling, aunque había quedado inválido permanente a los 35 años por la «enfermedad del cajón»—, y llegó a ser práctica común para todos los grandes puentes colgantes norteamericanos que siguieron. La suspensión se hacía por alambre de acero galvanizado (p. 724), cuyo grueso normal era de 5 mm, colocado en enormes carretes a los dos extremos del puente. Se arrastraban luego anillas de alambre a todo lo largo en ambas direcciones por medio de roldanas con cables sin fin movidas en las torres; eran ajustados por hombres que tra-

bajaban sobre pasarelas para asegurar el nivel correcto y la comba uniforme; y los alambres eran finalmente agrupados y atados (fig. 228).

Al acabar el siglo XIX el acero estaba reemplazando al hierro como material de construcción de puentes, y en Châtellerault, al nordeste de Poitiers, Hennibique había introducido el uso del hormigón armado (p. 608). J. B. Eads, que había construido chalupas cañoneras blindadas durante la Guerra de Secesión

Fig. 228. Compactando y uniendo cables en el puente de Brooklyn.

americana, utilizó el acero para los tres arcos de 150 m de su gran puente de San Luis, que fue proyectado para dar una altura de paso de 27 m, teniendo en cuenta los 12 m de las máximas crecidas del Mississippi y los 15 m de las grandes chimeneas de los vapores del río. Para asegurar cimientos adecuados en el cauce arenoso del río, introdujo en Norteamérica el uso de cajones de aire comprimido, pero había también el problema de la erección de los enormes arcos, para lo cual sería muy costoso, si no

enteramente impracticable, levantar el andamiaje sobre el agua. Para superar esta dificultad se construyeron torres provisionales sobre los pilares, por encima de las cuales se pasaban cables para retener las mitades de cada arco durante la construcción.

A los pocos años de la terminación con éxito del puente de San Luis en 1874, el principio de la viga voladiza *(cantilever)* fue plenamente empleado en el puente de acero del ferrocarril sobre el Firth en Forth (fig. 229), diseñado teniendo presente el reciente desastre del puente del Tay, y, sin embargo,

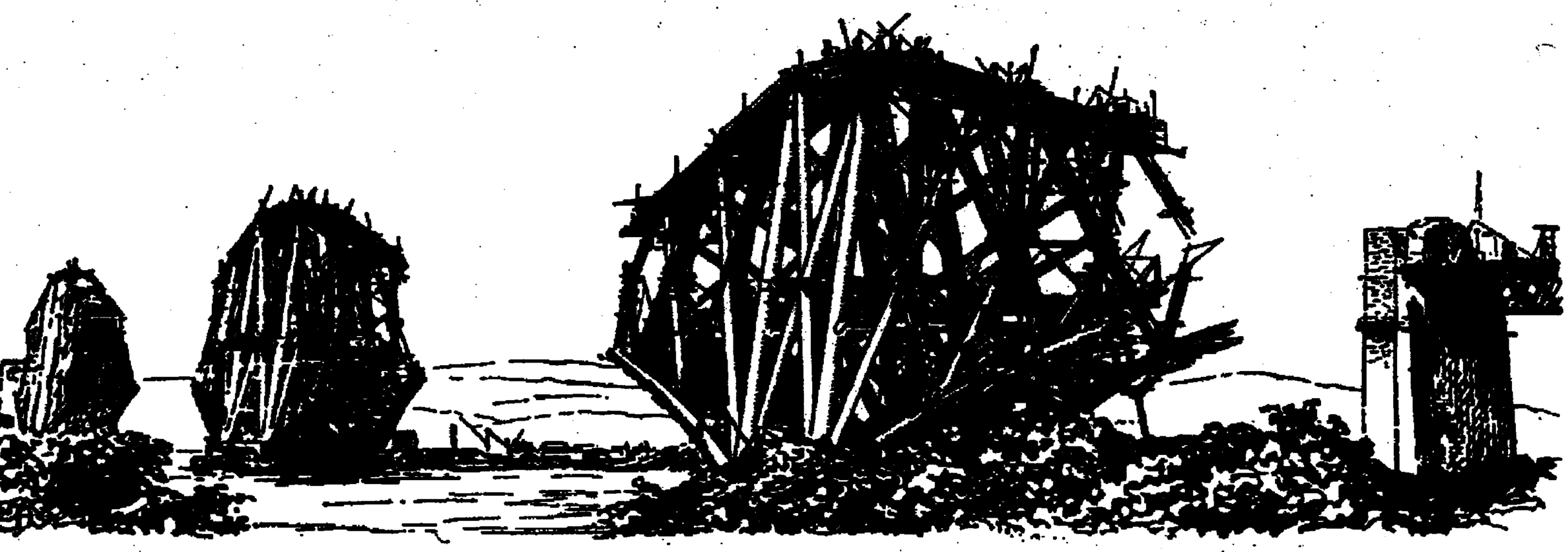


Fig. 229. Construcción del puente de Forth. Hacia 1890.

con luces tan grandes que no fueron sobrepasadas en ninguna parte hasta 1917. Para conservar el equilibrio, la obra fue construida simultáneamente a ambos lados de los tres pilares principales, inmensamente fuertes, que se hicieron casi cuatro veces más anchos en la base que en la cúspide para resistir los vientos, idea que su diseñador, John Fouler, describía pintorescamente como «el despatarramiento de Enrique VIII». Dos de los pilares tenían más cortos los tramos que enlazaban con la orilla, pero las luces principales, que enlazaban con el pilar del centro en la isla de Inchgarvie, requirieron una extensión total de 520 m. Los brazos del cantilever dejaban vanos de 107 m, a través de los cuales las placas en voladizo

eran construidas desde las vigas. La precisión del conjunto, en el que se utilizaban grúas hidráulicas y máquinas remachadoras, fue tal que cuando la obra de ambos lados estaba para ser empalmada sólo fue necesario encender un fuego improvisado de virutas y desperdicios para dilatarla 6 mm, a fin de insertar los últimos pernos. Las planchas de acero, de 5 m de largo, 1,4 m de ancho y hasta 32 mm de grueso, fueron fabricadas sobre la marcha y curvadas en la forma adecuada con una prensa hidráulica de 2.000 toneladas. El uso de 54.000 toneladas de acero fundido en solera en una sola estructura, la organización de talleres e instalaciones provisionales, que cubrían un área de 20 ha, y el éxito final de la vasta empresa, que a su terminación en 1890 redujo el tiempo del ferrocarril al norte de Escocia en una hora, ponen digno remate a la historia de la construcción inglesa de puentes en la era victoriana.

LOS TUNELES

El túnel inglés de ferrocarril más importante, el que pasa bajo el Severn, fue terminado tres años antes que el puente de Forth, pero unos pocos años después que los túneles históricos de Mont Cenis y San Gotardo, bajo los Alpes. Antes del siglo XIX apenas se necesitó el desarrollo de nuevas técnicas de construcción de túneles para cubrir las necesidades del transporte, pues no había túneles importantes de carretera, y los primeros túneles de canal, ya en la Francia del siglo XVII o en la Inglaterra del siglo XVIII, fueron abiertos en la roca firme aplicando los métodos largo tiempo empleados en minería (p. 362). Se cree que uno de los dos túneles del canal napoleónico de San Quintín, en Francia, fue el primer túnel ancho abierto a través de material que ejerce presión, en este caso arena, por medio de entibado y arcadas. Pero en 1830 el ferrocarril tuvo que entrar en Liverpool abriendo túneles a través de arcilla

blanda, así como arena húmeda, y desde aquel tiempo la construcción de túneles, en todas las condiciones, llegó a ser una parte aceptada de las obligaciones del ingeniero de ferrocarriles.

Uno de los varios modos de excavación consistía en proteger el techo del área inmediata de trabajo por medio de vigas empujadas hacia delante desde un espacio encima del entibado, apoyando sus extremos delanteros en postes que descansaban sobre una pequeña base en el fondo de la galería de avance. Conforme avanzaba la obra, los espacios que quedaban encima del entibado se rellenaban sucesivamente. Esta entibación de madera era completamente inadecuada, sin embargo, para un túnel a través de un terreno tal como el que existe bajo el Támesis en Londres, hazaña que Trevithick intentó, pero tuvo que abandonar después de tener encavada una galería de avance de 0,9 m de ancho por 1,5 m de alto durante casi 300 m de longitud, mientras M. I. Brunel, con su sistema de escudo mejorado y su inmensa decisión, fue capaz de lograrla sólo después de arrostrar dos grandes inundaciones y tres menores. El escudo de Brunel (fig. 230) permitía que 36 hombres atacaran el frente de trabajo simultáneamente, trabajando cada uno en un área rectangular de 2,3 $\times$ 0,9 m aproximadamente; había dos plataformas intermedias, de modo que podían trabajar a tres niveles dentro de la estructura principal, de hierro colado. La parte superior y el pie del escudo estaban articulados, y eran presionados hacia adelante por gatos que se apoyaban sobre la mampostería terminada, mientras gatos más pequeños sostenían tablas contra el frente, excepto en los puntos donde se estaba realmente picando. El escudo era movido hacia delante 45 cm cada vez, y a continuación se levantaba un doble arco de mampostería, hecho en cemento romano. Cuando seis hombres se ahogaron en la segunda inundación se paró el trabajo durante siete años, pero el recurso a un escudo más pesado y el taponamiento de los agujeros en el cauce del río con hor-

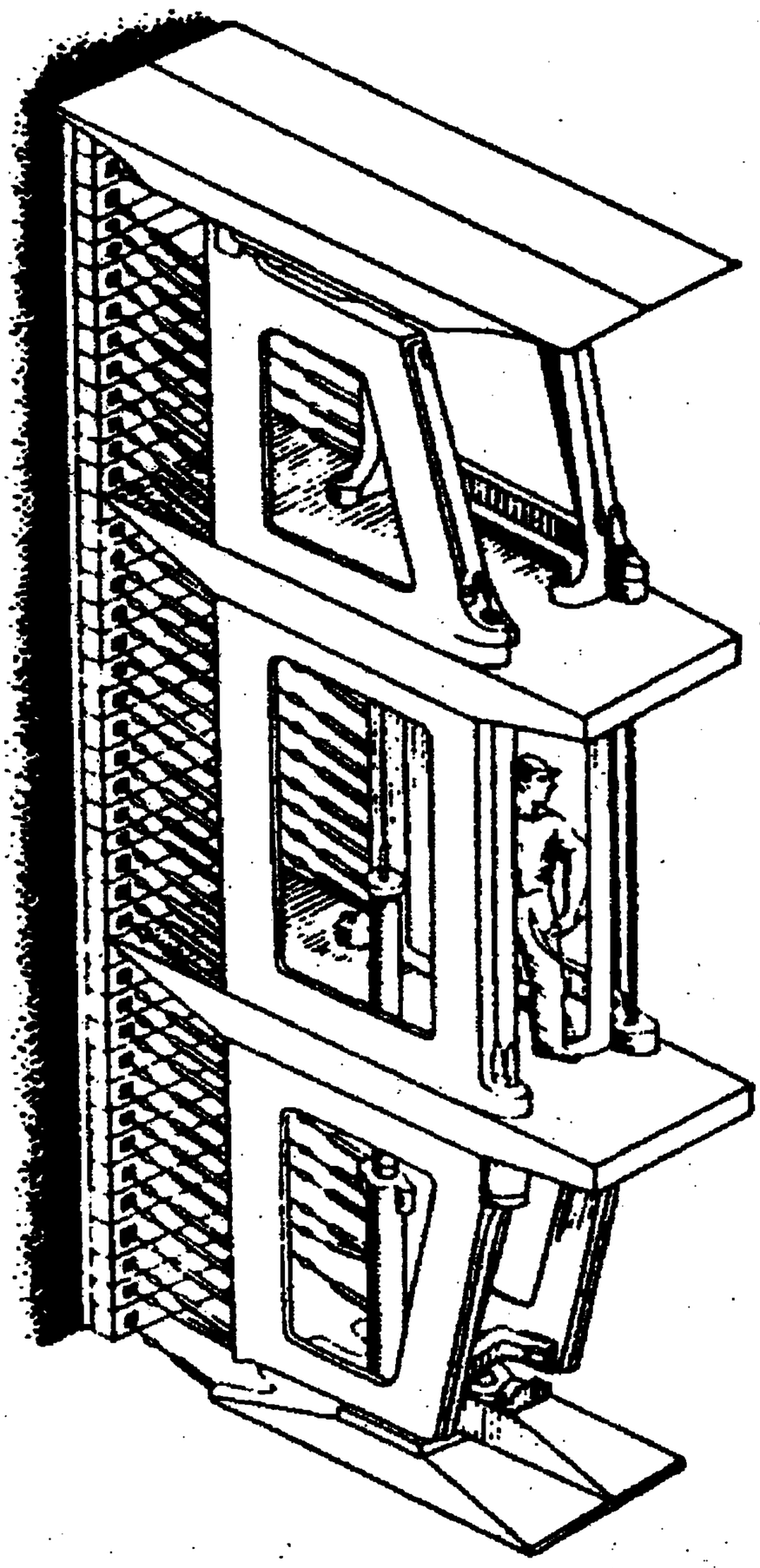


Fig. 230. Parte del escudo de Brunel para el túnel del Támesis.

migón de cemento Portland permitió terminarlo: el túnel, que fue inaugurado para peatones en 1843, está aún en uso para el ferrocarril subterráneo entre Wapping y Rotherhithe. El siguiente túnel bajo el Támesis fue el subterráneo de la Torre, de 2 m de diámetro, construido en un solo año, en 1869; éste fue revestido de anillos permanentes de hierro colado, y durante un tiempo tuvo capacidad para diminutos funiculares de 12 asientos.

Las longitudes de los grandes túneles ferroviarios alpinos —el de Mont Cenis, casi 13 km; el de San Gotardo, 15 km, y el del Simplón (empezado en 1898), casi 20 km— presentaron problemas especiales de perforación, ventilación y topografía. El trabajo en el túnel del Mont Cenis, para enlazar el ferrocarril

París-Lyon con Turín e Italia del Norte, fue empezado en agosto de 1857, tres años antes de que su extremo norte llegara a ser territorio francés por la cesión de Saboya a Napoleón III; su construcción fue un proyecto enteramente italiano, aunque Francia compartió el coste. La triangulación preliminar requirió el establecimiento de veintiún puntos topográficos en un difícil terreno montañoso; el correcto trazado del túnel fue señalado luego en postes a las dos entradas, y un telescopio, enfocado a lo largo de aquella línea, comprobaba la posición de una lámpara en el frente de trabajo. El túnel tenía que atravesar la roca firme, sin pozos intermedios, a una profundidad máxima de 1.600 m aproximadamente bajo la cumbre del monte Fréjus. La excavación avanzaba por ambos extremos al mismo tiempo, trabajando por etapas desde una galería avanzada de unos 3 m de lado, hasta que los muros de ladrillo cerraban un espacio de 8 m de ancho y 7,5 m de alto hasta la clave del techo arqueado. La voladura se hacía con pólvora, empezándose a usar durante la obra perforadoras neumáticas, accionadas por compresores hidráulicos, con los que se trabajaba tres veces más de prisa. El aire comprimido de las perforadoras ventilaba las galerías avanzadas; detrás el túnel quedaba dividido por un tabique horizontal de ventilación, lo que permitía introducir una corriente de aire a través de la parte inferior y expulsarla a través de la superior, técnica conocida por los mineros medievales. Hubo largos retrasos en los primeros años, pero los dos extremos se juntaron felizmente el día de Navidad de 1870, y el túnel fue inaugurado al año siguiente (fig. 231). El túnel de San Gotardo fue construido a razón de 1.600 m por año, mientras que el del Mont Cenis lo fue a razón de 800 m, lo que puede explicarse por la mayor experiencia, la disponibilidad desde el principio de maquinaria perforadora y el uso de dinamita (p. 798) para la voladura. Pero costó más de 300 vidas de obreros, principalmente italianos. La existencia de

siete vueltas en espiral en los accesos hizo el trazado extraordinariamente difícil, pero cuando las galerías avanzadas se encontraron en la mitad de la montaña la diferencia de altura era sólo de 10 cm, y horizontalmente, entre 15 y 20 cm, notable ejemplo de la precisión que habían conseguido entonces los instrumentos topográficos. En total la ruta de San Gotardo requirió cerca de 46 km de túneles en 170 km, pero su terminación en 1882 (el año de la Triple Alianza) redujo en 36 horas la duración del viaje entre Alemania e Italia.

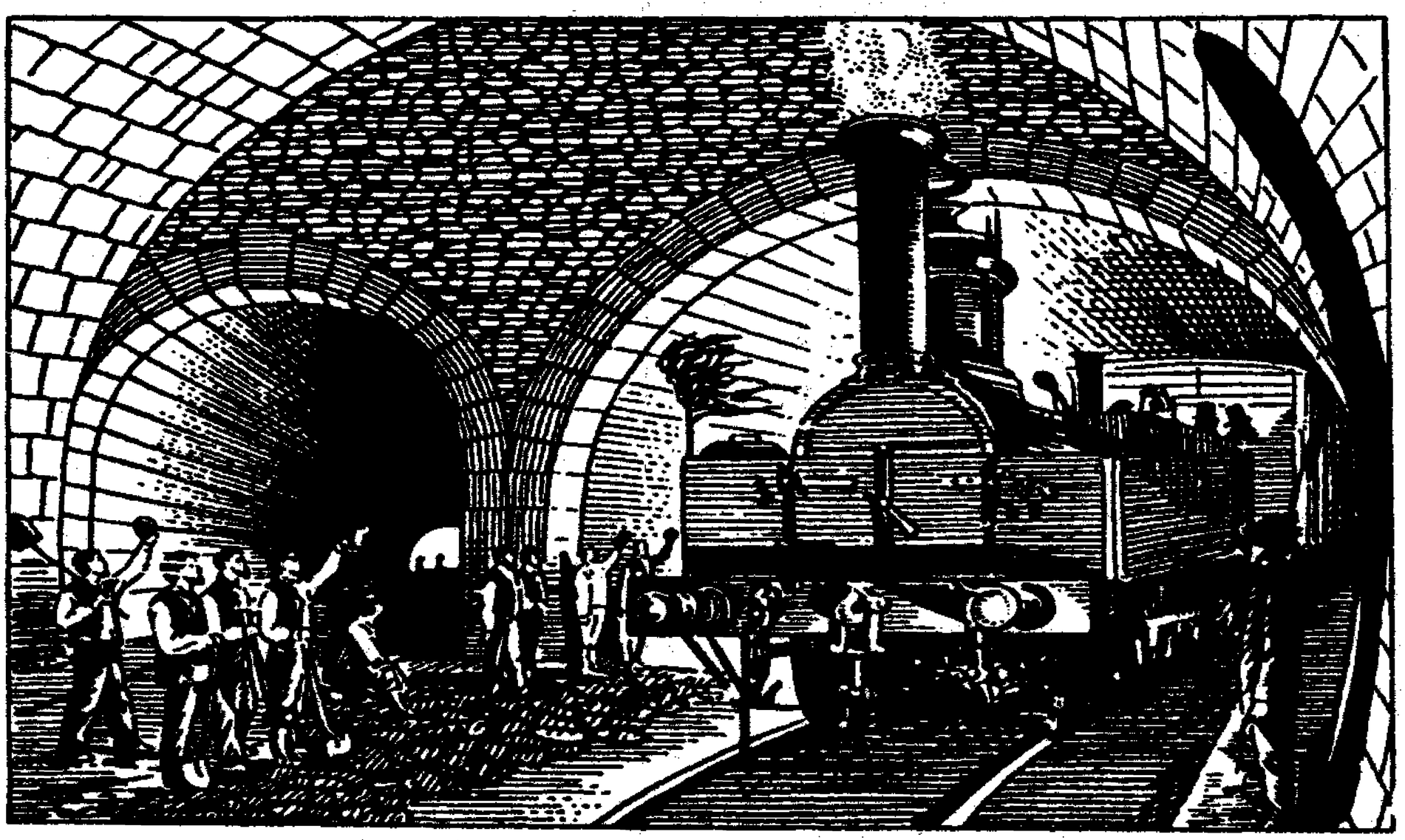


Fig. 231. El primer tren atraviesa el túnel del Mont Cenis, 1871.

La década de 1880 estuvo también asociada a tres grandes empresas subacuáticas en Inglaterra, a saber: el proyectado túnel bajo el canal de la Mancha, del que se excavó 1,5 km en el extremo de Dover en 1882 y 1887, frente a una gran oposición militar y política, que sólo ahora parece estar disminuyendo; el túnel ferroviario de 1,5 kilómetros de longitud que une Liverpool y Birkenhead (1886); y el más ambicioso túnel bajo el Severn, también inaugurado en

1886. La construcción de este último, de 7 kilómetros de longitud, duró trece años, principalmente a causa de un desastre ocurrido en 1879, cuando se tropezó con el río Big Spring (fig. 232) y se inundaron todas las obras, que por aquel tiempo se extendían bajo casi toda la anchura del estuario. Hubo que instalar bombas adicionales y abrir nuevos pozos en el lado de tierra del Big Spring. Ciertas medidas preventivas habían sido descuidadas en el pánico, y fueron llevadas a cabo más tarde por un buzo equipado con oxígeno comprimido que penetró 300 metros a través de los túneles inundados. En estas cir-

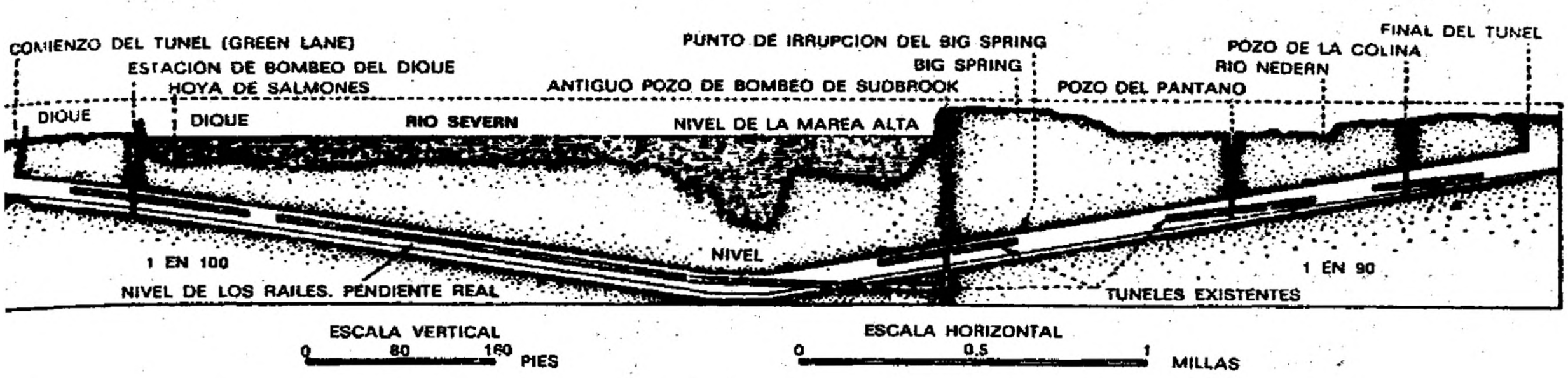


Fig. 232. Sección del túnel del Severn, tal como se encontraba en octubre de 1879, cuando el Big Spring inundó las obras.

cunstancias es comprensible que el túnel fuera finalmente provisto de una potencia de bombeo de más de dos veces el máximo de admisión de agua experimentada, que era de 136.000.000 de litros al día. Otra característica notable es el tamaño de los ventiladores que se necesitaban en los extremos del túnel para hacer frente a los efectos del tráfico pesado movido por locomotoras de vapor: el del pozo principal junto a Monmouthshire tiene 12 metros de diámetro. El revestimiento interior es de ladrillo vitrificado recibido en cemento de 0,75 a 1 metro de grueso.

Métodos y materiales más nuevos aparecen en la construcción del túnel bajo el río Hudson, en Nueva York, que fue empezado en 1874 pero que, como

resultado de las dificultades financieras, no se terminó hasta 1908. El proyecto implicaba abrir dos vías paralelas, de 5 metros de ancho y 5,5 metros de alto, principalmente a través del limo subacuático; el río tiene 1,5 kilómetros de ancho. La excavación se hizo en una cámara de aire comprimido a una presión de 3.500 gramos/centímetro cuadrado, lo que exigía, por razones de salud, el uso de una esclusa de aire al nivel del suelo, en la que la presión del aire podía reducirse lentamente, para evitar la «enfermedad del cajón» entre los obreros. En una fase posterior tres ingenieros asesores británicos, incluyendo a J. H. Greathead, que había hecho el subterráneo de la Torre, pusieron en uso un escudo de acero (fig. 233) movido hacia delante por pistones hidráulicos mientras el aire comprimido impedía la entrada del cieno y el agua. En la extremidad del escudo, proporcionando el tope sobre el que actuaban los gatos, anillos de hierro fundido formaban el revestimiento interior del túnel: tales anillos eran a la

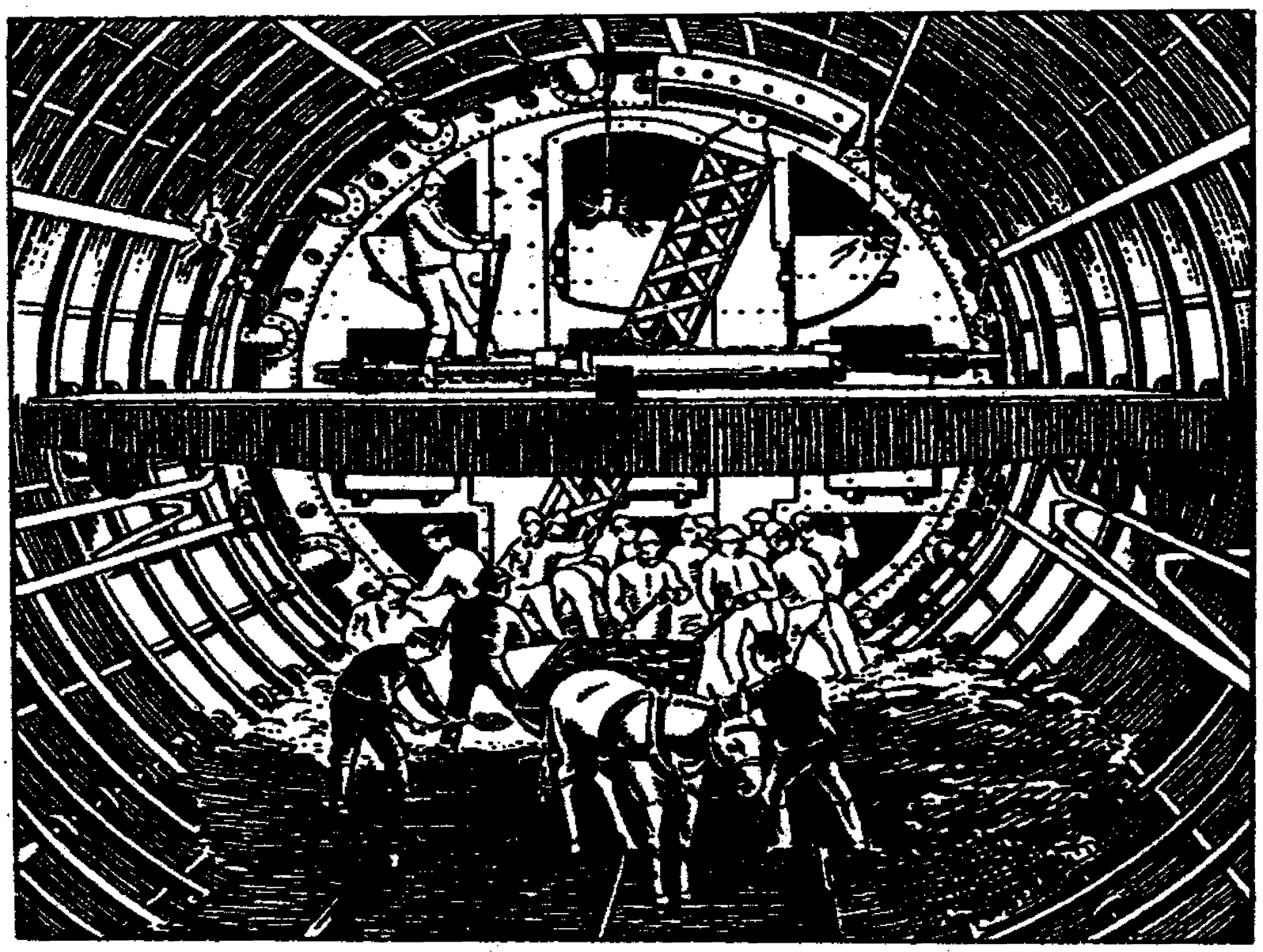


Fig. 233. Escudo de acero usado en la construcción del túnel del río Hudson.

vez duraderos y fáciles de manejar. Se estaba consiguiendo una velocidad de 22 metros por semana cuando se presentaron dificultades financieras por segunda vez. Greathead, sin embargo, consiguió demostrar el valor tanto de sus anillos de hierro colado como de lo que llegó a ser conocido como el «escudo de Greathead» en 1890, cuando terminó el primer ferrocarril subterráneo, de 5,5 kilómetros, para la línea de la City y el sur de Londres (p. 557). Sus métodos siguieron utilizándose cuando el nuevo tipo de transporte se extendió bajo Londres, pero el aire comprimido se empleó sólo donde la línea pasaba de la arcilla a la grava acuífera.

OBRAS TERRESTRES PARA FACILITAR EL TRAFICO MARITIMO

La carretera mejorada, el canal y el ferrocarril figuran entre los más importantes de los múltiples factores que estimularon el crecimiento del comercio marítimo. Así el tonelaje anual de los buques que entraron en el Támesis fue de 1.750.000 en 1800 y 13.000.000 en 1891. Tal desarrollo no podía haber ocurrido sin el aumento correspondiente de los servicios portuarios de todas clases. Al final del siglo XVIII John Smeaton registraba una profundidad de menos de 1,5 metros en la parte del Clyde donde más tarde fue botado el *Queen Mary*. Pero aun antes de que un barco entrara en un estuario, la construcción tenía un papel importante que desempeñar a través del desarrollo de los faros: es significativo que la edificación del ejemplar británico más conocido fue casi exactamente contemporánea del comienzo de los grandes cambios industriales en el reinado de Jorge III.

Diversos faros existentes en el peñón de Eddystone, construidos principalmente de madera, habían sido destruidos por la borrasca en 1703 y por el fuego en 1755; por eso Smeaton reconstruyó el faro como la primera de las grandes torres barridas por las

olas, construidas de piedra (fig. 234). Como el peñón de Eddystone se enfrenta directamente con las tormentas del Atlántico en un emplazamiento hasta el que no podían transportarse en aquellos días bloques individuales de gran volumen, Smeaton asentó sus piedras en la roca firme lo mejor que pudo; ensambló a cola de milano cada piedra con su ve-

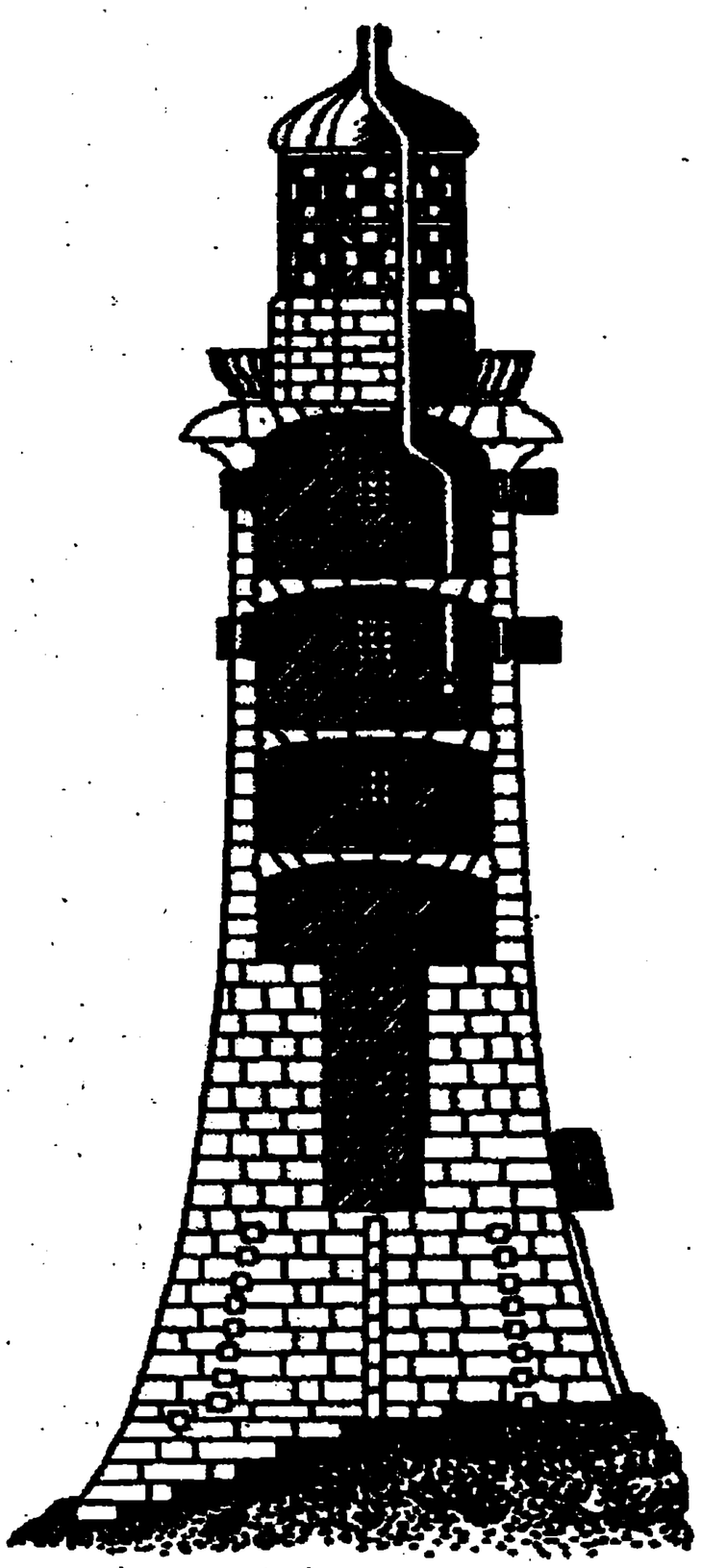


Fig. 234. Faro de Eddystone, construido por Smeaton, 1759.

cina; y sujetó cada hilada a la de encima y a la de abajo con clavijas de roble. Como se tomó también el trabajo de hallar un fuerte mortero hidráulico (p. 589), el resultado final fue excepcionalmente sólido. Finalmente se volvió inseguro, no por defecto de la estructura, sino por erosión de la roca bajo los cimientos. Después de resistir bien las tormentas de 120 años, el faro de Smeaton fue reedificado en Plymouth Hoe, mirando a través del agua a su mo-

derno sucesor, un tercio más alto pero cuatro veces y media más grueso, que fue construido con la ayuda de una ataguía. La torre de Bell Rock, de 1811 (fig. 235), y el faro de las Skerryvore Rocks, en Argyllshire, construidos por Robert y Alan Stevenson (respectivamente, abuelo y tío del escritor), son torres de piedra que aún perduran, pero una estructura de hierro en la Bishop Rock, en las islas Scillies, considerado como el emplazamiento más expuesto del mundo, fue arrastrada por una tormenta en 1850 cuando iba a recibir su linterna. La torre de hierro

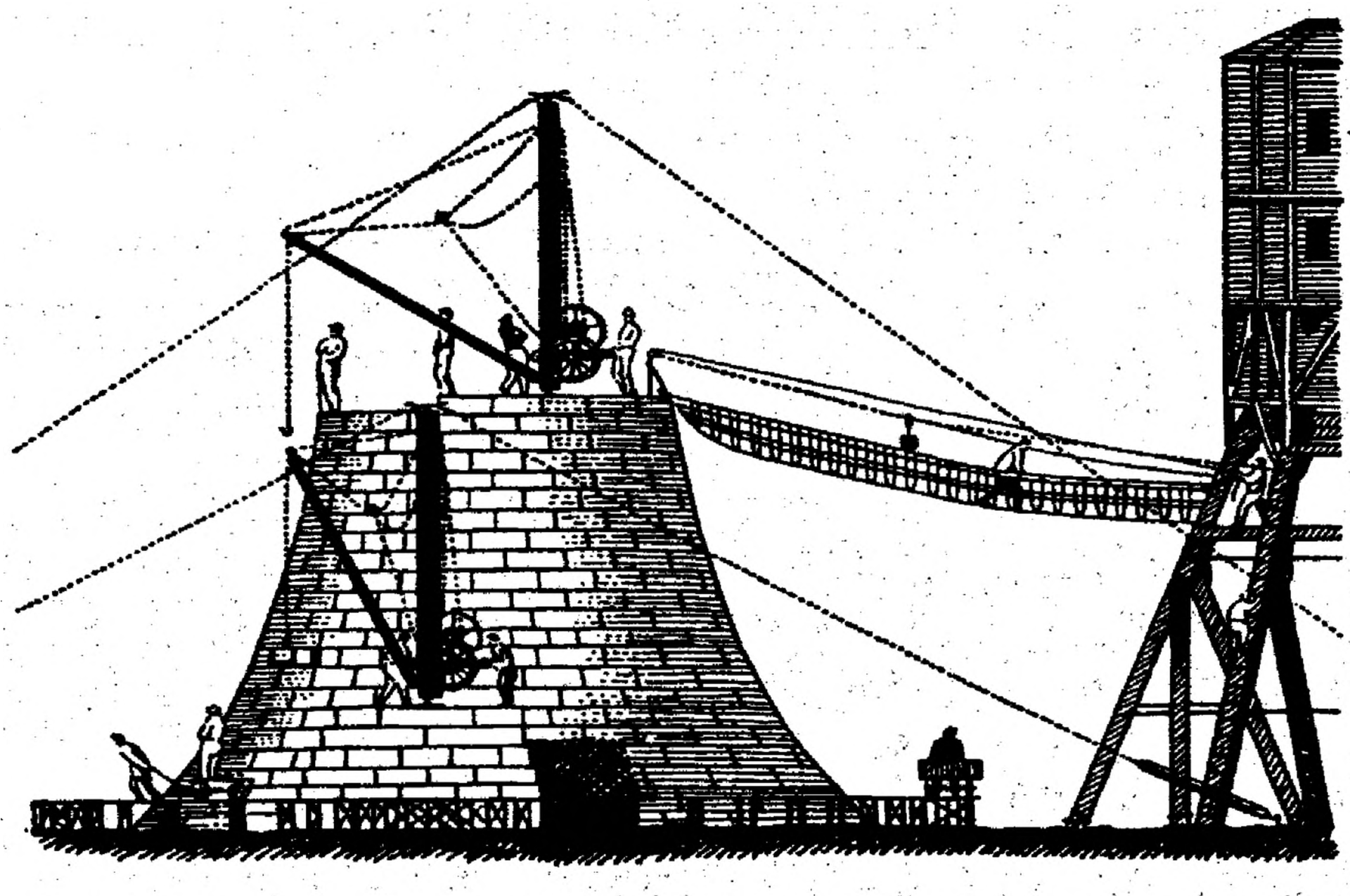


Fig. 235. Construcción del faro de Bell Rock, 1811.

colado construida pocos años más tarde en la Fastnet Rock, que marca el extremo sur de Irlanda, fue también finalmente sustituida por una de granito. En general, fueron preferidos los faros de piedra, excepto cuando los cimientos tenían que ser de hierro y acero, hasta los días de la construcción de hormigón armado.

En 1780, durante la Guerra de Independencia americana, los franceses empezaron la construcción de

un puerto artificial en Cherburgo, un rompeolas coronado por baterías para mantener a raya tanto a los temporales como a los ingleses. En el curso de ocho años, dieciocho estructuras de madera de forma cónica, de 21 metros de alto, con un diámetro que disminuía desde 45 a 18 metros, fueron remolcadas al mar, rellenas de piedras y hundidas. Pero estas estructuras se abrieron y los montones de piedras, que estaban en una pendiente de uno por tres en aguas profundas, fueron allanados hasta una pendiente de uno por diez más cerca de tierra por la acción de la marea. Finalmente se superpuso un lecho de bloques que pesaban 3 ó 4 toneladas cada uno, coronado por fuertes, pero los temporales los destruyeron. Esta vasta obra no se terminó completamente hasta 1850, cuando la cal hidráulica de Vicat permitió construir un malecón de hormigón con mampostería, que alcanzaba desde el nivel de la marea baja hasta una altura de 3 metros por encima de la marea alta. Algo similar, pero en una escala menos ambiciosa, fue emprendido por John Rennie enfrente del puerto de Plymouth. Tropezó con la misma dificultad para obtener un material que formara una pendiente satisfactoriamente inclinada; su gran banco de cascotes de piedra caliza tomó la misma forma casi que las piedras que se salieron de las estructuras de madera de Cherburgo. Pero en el proyecto inglés, que fue llevado a cabo en 1812-41, se utilizaron bloques de 10 toneladas para el exterior, porque éstos resistirían en una pendiente de uno por cinco, y se aseguró la parte superior pavimentándola con bloques de granito recibidos en cemento.

Las obras del puerto de Ramsgate, que fueron terminadas por Smeaton, son un buen ejemplo de un puerto comercial enteramente artificial; era sumamente urgente para proteger a los barcos cogidos en las borrascas del norte cerca de las Goodwin Sands. El problema que afrontó Smeaton en 1774 fue la obstrucción con sedimentos de la dársena

exterior en una proporción a la que no podía hacer frente la fuerza de trabajo disponible. Lo resolvió cercando una dársena interior, de la que podía soltarse el agua en marea baja a través de una de sus seis esclusas. Una barcaza manejada en su recorrido contribuía a que el ímpetu del agua formara el cauce de un ancho canal; a causa de la rápida corriente el material en suspensión era depositado bien lejos de la entrada del puerto. El mismo principio de dejar que el agua hiciera el trabajo fue aplicado más tarde en las bocas tanto del Mersey como del Ribble, descargando piedra en cantidad para dirigir la corriente hacia canales especiales.

El equipo de dragado, necesario desde los primeros tiempos para mantener los canales abiertos tanto para el drenaje como para la navegación, empezó con el uso de una pala o saco en el extremo de un palo, movida desde un bote a mano a lo largo del fondo del agua. Los holandeses, como era de esperar (p. 108), tomaron la delantera en el desarrollo de recursos más efectivos, tales como dragas de cuchara, para limpiar canales anchos; dragas de cuchara prensil, que empleaban un par de tenazas suspendidas entre pontones; y la draga rosario, que levantaba el barro blando sobre tablas lisas que una cadena hacía girar. Alrededor de 1750 empezó a usarse una draga de cadena más eficaz, que sacaba su carga en cangilones, pero el primer gran paso en la modernización fue la introducción del vapor. Una máquina de Boulton y Watt de 4 cv fue enganchada a una draga de cuchara en Sunderland ya en 1796; en 1804 una draga de vapor con un rosario de cangilones fue construida independientemente por Oliver Evans para los muelles de Filadelfia y por Rennie en Hull, de donde se extendió al Clyde en 1824 y al Ribble en 1839. Otras mejoras se hicieron, como hemos visto (p. 648), durante la construcción del canal de Suez. El uso de una bomba centrífuga con una draga se inició en América en 1871, y a finales

de siglo la barra de Liverpool estaba siendo despejada por una bomba cuya rueda móvil podía habérselas con sólidos mucho más gruesos que la arena, trabajar a una profundidad de 21 metros y descargar a razón de más de 5.500.000 litros por hora. Sin embargo, otro sistema de dragado de fines de siglo consistía en bombear agua a través de tubos colocados en un depósito de barro, de modo que el barro pudiera salir en suspensión con la marea baja, lo que suponía un perfeccionamiento de los métodos de eliminación del sedimento practicados por Smeaton mucho antes.

Pero la característica del puerto industrial moderno fue la existencia de muelles para hacer que la carga y descarga de los barcos dejaran de depender de la marea y de los incómodos y costosos servicios de las gabarras. Los muelles no fueron enteramente desconocidos en el siglo XVIII —el Howland Great Wet Dock de Rotherhithe fue terminado en 1700 y en Liverpool se empezó a construir un muelle en 1709, año en que esa ciudad comenzó a practicar el comercio de esclavos—, pero incluso Londres encontraba que uno era suficiente hasta que las notorias depredaciones de los ladrones de río movieron a los intereses comerciales a emprender una acción concertada, que empezó con la institución de la Policía del Támesis en 1798. Los muelles de las Indias Occidentales, los primeros en la orilla norte del río, fueron construidos en 1802 por William Jessop, discípulo de Smeaton; a éstos siguieron casi inmediatamente los muelles de Londres, situados más cerca de la City, donde Rennie introdujo columnas y techos de hierro colado en los edificios de los muelles y el uso de grúas de vapor en éstos. La inauguración de los muelles de las Indias Orientales tuvo lugar en 1808, y desde aquel tiempo el desarrollo de los muelles continuó durante todo el siglo XIX como efecto y causa a la vez de la concentración de barcos en determinados puertos. Con fines de reparación, don-

de no podía disponerse de un dique seco, se inventó el dique flotante, que podía remolcarse a cualquier parte del mundo y seguir a flote con un barco dentro de él después de haber sido bombeada el agua. Un dique seco de hierro para uso de la Armada Real fue botado en North Woolwich en 1868 y remolcado con éxito a las Bermudas.

16. EL CARBON Y LOS METALES

LA MINERIA DEL CARBON

En la última parte del siglo XVIII la minería del carbón constituía una industria firmemente asentada desde hacía mucho tiempo en ciertas partes de la Europa occidental, especialmente cerca de la costa nordeste de Inglaterra (fig. 236), donde las minas de carbón fueron, bastante significativamente, el primer campo de operaciones de la máquina de bombeo de Newcomen. De esta máquina provino el nuevo motor que, a su vez, gracias a la industria de la minería del carbón, pudo ser abastecido de combustible y mantenerse en funcionamiento. En 1900 se extraía carbón en todos los continentes, y la producción de los Estados Unidos excedía ya a la de Inglaterra; sin embargo, el carbón gozó de una posición privilegiada durante este siglo y medio como la materia prima cuya abundancia, más que nada, permitía a Gran Bretaña aprovecharse de la primacía que había establecido en la fabricación de la máquina de va-

Fig. 236. Transporte de carbón desde la mina a la barcaza, según aparece en un dibujo de las minas de carbón de Tyne y Wear, 1788.

por y de las nuevas máquinas-herramienta y en el perfeccionamiento de los nuevos medios de transporte. Los inventos mecánicos y la producción de carbón se influyeron, desde luego, mutuamente; su historia conjunta nos ofrece un sucinto sumario de cómo Gran Bretaña llegó a ser, y durante algún tiempo siguió siendo, el «taller del mundo». En 1770, cuando Watt trabajaba en su máquina de vapor, la producción británica de carbón era de un poco más de 6 millones de toneladas. En 1856, cuando empezó a obtenerse el acero Bessemer, ascendía a 65 millones de toneladas. A finales de siglo se aproximaba a su máximo de todos los tiempos (alcanzado en 1913), con la gigantesca cifra de 220 millones de toneladas.

Durante mucho tiempo el aumento de la producción dependió principalmente de la disponibilidad de una oferta casi ilimitada de trabajo barato: las familias de los mineros y los inmigrantes irlandeses que afluían a la costa occidental de Gran Bretaña. La máquina de vapor, para la que se disponía de combustible tan barato, hizo su aparición primero en la superficie de las minas, cada vez más en forma de la «máquina de Cornualles» de alta presión de Trevithick (p. 470), sin la que las minas profundas no podían librarse del agua, pero su empleo para elevar el carbón y a sus picadores desde las profundidades se produjo mucho más lentamente. A principios del siglo XIX aún había mujeres escocesas que subían el carbón en cestas de mimbre por escaleras de 30 metros o más (fig. 237). En el West Riding de Yorkshire, en 1840, se usaban todavía tornos para elevar pesos a mano y se puede juzgar el grado de dependencia con respecto a los malacates por el hecho de que entonces éstos eran considerados también adecuados para elevar la tierra de las excavaciones de los túneles del ferrocarril. El tambor de cable horizontal, de 3,5 a 5 metros de diámetro, alrededor del cual daban vueltas los caballos, fue sustituido sólo gradualmente por un tor-

Fig. 237. Mujeres acarreando carbón, Escocia. Principios del siglo XIX.

no movido, por lo general, por una máquina de vapor vertical, de baja presión y un solo cilindro. También hacia 1840 se consiguió aumentar su eficacia con la introducción de cables de alambre, que eran no sólo más fuertes sino también menos expuestos a retorcerse y a balancearse que los de cáñamo. Pero la extracción mecánica del mineral siguió siendo lenta a la par que desaprovechaba el vapor, y fue difícil idear algún tipo de contrapeso satisfactorio para el peso variable de la cuerda colgante según que la carga subiera o bajara dentro del pozo.

Mientras tanto, se trabajaba en minas de creciente profundidad apartando el mineral a mano y mediante palancas, en áreas sucesivamente abiertas, de forma harto peligrosa, por medio de cargas de pólvora negra; la mecha de seguridad no se inventó hasta 1831. El modo de extracción más corriente era el conocido tradicionalmente como de «cámaras y pilares», excavando primero las cámaras en ángulo recto en toda la capa de carbón o en algún área más pequeña que se deseaba mantener separada para seguridad o mejor ventilación. Estas cámaras dividían el resto del carbón en pilares de 18 a 50 metros cuadrados, que se quitaban luego picando tramos de unos 5 metros de ancho de una sola vez. El techo se entibaba con maderos durante la excavación del tramo, y se le dejaba luego hundirse, plan que funcionaba satisfactoriamente siempre que se mantuviera un ángulo de unos 45º entre la línea de derribo y las fallas o grietas naturales del techo, y que la roca situada encima no tuviera más de unos 275 metros de grosor: con mayor espesor existía grave riesgo de derrumbamiento. En las minas muy profundas, corrientes en la segunda mitad del siglo, se hizo necesario evitar el riesgo de aplastamiento de los pilares extrayendo el carbón en una sola operación conocida como laboreo de «tajo largo». Por este método se extrae en línea una capa de carbón de unos 90 metros de longitud, y conforme la capa o frente de trabajo avanza, se construyen muretes de

piedra en seco en ángulo recto con la dirección del avance para sostener el techo cuando ha sido retirado el carbón.

El acarreo del carbón del tajo al pozo se hacía al principio cargando cestos con mimbre en narrias de madera. Cuando aumentaron las distancias, se empezaron a usar vagonetas de ruedas, y muy a finales del siglo XVIII Thomas Wilson, el poeta minero de Tyneside, cantaba al hombre «que inventó por vez primera los carriles de metal», es decir, los ligeros raíles de hierro que aliviaron grandemente el trabajo del minero que empujaba las vagonetas. El hecho de que los carretones fueran generalmente arrastrados por mujeres y niños rudamente atalajados es una circunstancia horripilante, pero en el siglo XVIII eran ellos quienes normalmente ejecutaban las tareas auxiliares relacionadas con el trabajo de los hombres, por malsanas y exigentes que fueran; además, ellos podían hacer el arrastre en pasajes demasiado bajos aun para el *pony* de mina (fig. 238), introducido hacia 1763. El trazado de algunas minas

Fig. 238. Extracción de carbón en la mina de Bradley, Staffordshire. Principios del siglo XIX.

facilitaba la utilización de galerías inclinadas que podían recorrer los carretones cargados, pero había muchas otras donde el camino al pozo implicaba tener que remontar pendientes. En 1812 George Stephenson fue contratado para modificar una bomba de drenaje con el fin de que arrastrara el carbón por un plano inclinado, y ya en 1840 se instalaban corrientemente bajo tierra máquinas fijas con el mismo fin. En 1844, el ingeniero de minas John Buddle introdujo un sistema de transporte por cable sin fin en Wallsend, y el sistema de arrastre por máquinas de vapor se fue generalizando en las galerías principales, aun en horizontal. Pero cada mina grande tenía kilómetros de galerías secundarias, que alimentaban de carbón a las principales, y estas galerías secundarias continuaban siendo explotadas por animales, por hombres y —aun después de la Ley de Minas de Lord Shaftesbury en 1842— por niños que habían alcanzado la edad de diez años.

El aumento de la profundidad a que se explotaba el carbón, que acompañó inevitablemente al enorme incremento de la cantidad extraída, creó un tercer problema, además del de la extracción del agua de las explotaciones y de la elevación del mineral y de los propios obreros. Este problema era la presencia de gas en las minas. Mientras eran poco profundas sólo se encontraba una mofeta ligera (aire deficiente en oxígeno, cuyo peligro podía el minero reconocer generalmente a tiempo, porque la luz que llevaba se amortiguaba gradualmente). Pero cuando aumentó el uso de explosivos, el peligro se hizo mayor con la presencia de mofeta más enrarecida —es decir, el producto de la combustión incompleta que queda después de la explosión, con un alto contenido de monóxido de carbono—, que deja inconscientes a sus víctimas sin que lleguen a darse cuenta de su presencia. En tercer lugar, a mayores profundidades existía el inesperado peligro del grisú. Este gas es la mezcla explosiva formada cuando el gas metano se libera del estrato de carbón o de sus inmediacio-

nes, con frecuencia en muy grandes cantidades, y entra en contacto con el aire. El actual responsable de las condiciones de seguridad en el interior de las minas de carbón era originalmente un minero que protegía a sus compañeros yendo delante de ellos en las explotaciones, donde se tendía cubierto con sacos húmedos sosteniendo un candil encendido en el extremo de un palo largo para prender fuego al gas (fig. 239). Pero a pesar de esta peligrosa forma de precaución hubo una serie de explosiones desastrosas en las profundas minas del nordeste de Inglaterra, que condujeron a la formación en 1813 de la Sociedad de Sunderland para evitar accidentes en las minas de carbón.

La lámpara de seguridad, llamada también lámpara de Davy, por haber sido inventada por el primer químico de la época, marca un hito en las rela-

Fig. 239. Quema de grisú.

ciones entre ciencia y tecnología, como también en el uso de la tecnología con fines humanitarios más que puramente económicos. Pero no fue el primer aparato de seguridad, ni la única lámpara resultante del llamamiento de dicha Sociedad, ni la solución perfecta del problema. Antes de mediar el siglo XVIII un hombre de Whitehaven había inventado un molino de pedernal y acero capaz de producir una corriente continua de chispas que brillaban suficientemente para trabajar pero que se iban haciendo —y esto servía de aviso— mayores y más luminosas en presencia del gas explosivo. El invento se propagó al resto de Europa, pero podía originar tanto el aviso como las explosiones. En competencia local con Sir Humphry Davy estaban George Stephenson y un médico irlandés, W. R. Clanny, los cuales hicieron una serie de lámparas cada vez más logradas, aunque fue la tercera lámpara de Davy la que, llevada bajo tierra en enero de 1816, hizo exclamar al director de minas e ingeniero John Buddle con entusiasmo optimista: «Por fin hemos sometido al monstruo». En unos meses Davy había descubierto las condiciones bajo las cuales hace explosión el grisú, y pensado cómo poder mantener en condiciones seguras una llama en su presencia. Llegó a la conclusión de que al pasar a través de un cilindro de tela metálica fina, la llama perdía tantos grados de calor que ya no podía inflamar los gases. Además, la lámpara (fig. 240) revelaría la presencia de grisú por el alargamiento de la llama y la formación de un casquete azul sobre ella. La tela metálica de Davy tenía el defecto, originalmente, de que cuando se ponía al rojo, a lo que estaba particularmente expuesta en una corriente de aire, la llama la traspasaba. Para remediarlo, se añadió una segunda tela metálica y un sombrerete protector, mientras que su valor como lámpara para trabajar aumentaba al proveerla de un cilindro de cristal, permitiendo la tela metálica la entrada del aire por debajo o por encima de la llama.

Otras mejoras fueron introducidas por Meuseler en Bélgica y Marsaut en Francia.

Mientras se perfeccionaba la lámpara de seguridad para reducir al mínimo el riesgo de explosión, el perfeccionamiento del sistema de ventilación constituía la forma obvia de combatir la causa del riesgo: las mezclas de metano y aire no hacen explosión si el contenido de metano es menor del 5,4 por 100.

Fig. 240. Lámpara de Davy, tal como se usaba en 1816.

El pozo que daba acceso a la mina era al mismo tiempo su medio natural de ventilación, y una medida de seguridad manifiesta era tener dos pozos, para proporcionar una corriente continua de aire a través de las explotaciones. Esta precaución no se hizo obligatoria, sin embargo, hasta después de un accidente ocurrido en una mina de un solo pozo en Hartley, Northumberland, en 1862, cuando el hundimiento de una viga de hierro colado que sostenía la gran bomba bloqueó el único medio de acceso, con el resultado de que 202 personas, hombres y niños, quedaron sepultados vivos. Al pie del pozo

de salida del aire se instalaba comúnmente un horno, para que la corriente ascendente de aire caliente pudiera asegurar una ventilación constante de las explotaciones, aunque se necesitaron cálculos cuidadosos para evitar la acumulación de bolsas de gas lejos de la corriente principal; en algunas minas se podía ver arder en la superficie el grisú extraído. La primera bomba de aire para ventilación, introducida por Buddle en 1807, fue un pistón de madera que funcionaba en un cilindro con encamisado también de madera, y extraía 170 metros cúbicos de aire por minuto: esta capacidad de ventilación puede ser comparada con los 4.500 metros cúbicos por minuto desplazados por el ventilador de Nixon hacia finales de siglo. Alrededor de 1830 fueron introducidos ventiladores movidos por vapor. Al mismo tiempo se comprendió que las galerías que daban acceso al frente de arranque del carbón debían servir también de forma sistemática para la ventilación. Se hizo práctica habitual abrir galerías paralelas conectadas sólo al final, para obligar al aire a circular por todas partes. Las necesidades de tráfico, sin embargo, hacían con frecuencia necesario el uso de rutas adicionales, hacia las que la corriente de aire debía desviarse lo menos posible: de aquí la frecuencia de puertas giratorias de madera, que eran abiertas y cerradas por niños pequeños para que pasaran las vagonetas de carbón, niños que esperaban en silencio y a menudo en la oscuridad, hasta que los redimió Lord Shaftesbury.

En la segunda mitad del siglo XIX las condiciones de trabajo en las minas de carbón no cambiaron fundamentalmente: en 1900 todavía iban bajo tierra muchachos de doce años. Aunque los riesgos de la mofeta se habían reducido mucho, las explosiones desastrosas continuaban, en parte porque el peligro de la inflamación del polvo fino del carbón no se apreciaba todavía y en parte porque las normas de seguridad existentes eran frecuentemente ignoradas. Hacia 1900 casi todo el carbón se cargaba sobre va-

gonetas de ruedas, tendiéndose los raíles tan cerca como era posible del frente de arranque del carbón, para que pudieran llenarse las vagonetas sin que el picador tuviera que arrojar hacia atrás su carbón más que una vez o a lo sumo dos. Esto significó la construcción de muchas galerías, subsistiendo el esfuerzo físico de llenar las vagonetas; hasta 1902 no se inventó ningún aparato satisfactorio para el transporte del carbón desde el frente de arranque. En cuanto al propio picado, la primera máquina rozadora práctica fue un aparato en forma de sierra circular, accionado por aire comprimido. Siguieron otras máquinas neumáticas, en las que las rozadoras estaban situadas en los eslabones de una cadena o a lo largo de una barra giratoria. Todas adolecían, sin embargo, del defecto de que el aire comprimido, aunque seguro para uso subterráneo, era antieconómico a causa de las pérdidas de transmisión, con frecuencia considerables, entre el compresor y la máquina; la rozadora eléctrica, que eliminaba este defecto, fue un perfeccionamiento muy posterior.

En general, la extracción de carbón —esencial para prácticamente todas las industrias— continuaba dependiendo de un trabajo ejecutado en condiciones peculiarmente agotadoras: las voladuras, que se habían hecho más seguras gracias a las mejoras introducidas en los explosivos y más fáciles gracias al uso de una perforadora de aire comprimido para abrir los agujeros de los barrenos, sólo podían preparar el camino. El picador, en el frente de arranque del carbón, trabajando en un espacio muy reducido, a menudo con un calor insoportable, y a veces en condiciones muy húmedas, practicaba un corte tan cerca del suelo como le era posible, en una profundidad de un metro, preparando así el desprendimiento del mineral con picos, palancas o cuñas. Ni el trabajo con las palas u horcas para cargar las vagonetas, ni el que implicaba la instalación de numerosos estemples de pino o abeto para asegurar el techo durante la excavación, ni el diario trayecto a lo lar-

go de los bajos, escabrosos y a menudo húmedos pasajes entre el pozo y el frente de arranque, permitían mucho respiro del agotador esfuerzo físico.

HIERRO COLADO Y FORJADO

En la primera mitad del siglo XVIII, como hemos visto ya (p. 214), los Darby de Coalbrookdale habían dado un nuevo uso al carbón. Al utilizar carbón con bajo contenido de azufre, buscaban un medio de sustituir el carbón de leña por coque, para fundir, partiendo de menas cuidadosamente seleccionadas, un hierro de gran liquidez, con el cual moldeaban ollas y otros artículos de ferretería similares, de diseño excepcionalmente ligero y delicado. Pero la fundición obtenida de este modo era quebradiza por las impurezas, especialmente fósforo, que se introducían en ella, dada la alta temperatura a la que se realizaba la fusión. Por ello, al principio la fundición era inaceptable para otras manufacturas, excepto para clavos comunes (p. 695). Pero desde 1760 aproximadamente la adopción de una multitud de mejoras impuso progresivamente los hornos caldeados con coque. En aquel año no ascendían a más de diecisiete; en 1775 había treinta y uno, y en 1790, ochenta y uno, cifra que representaba prácticamente las cuatro quintas partes del total de los altos hornos británicos. Además, su emplazamiento, predominantemente en Stadffordshire, sur de Gales, y zonas de las tierras bajas de Escocia —y no en los centros tradicionales de función de hierro británicos, tales como el Sussex Weald— ponía de relieve la nueva dependencia del hierro con respecto al carbón mineral, la cual estaba transformando la distribución geográfica de la industria pesada en toda Inglaterra.

El primer cambio fue la fabricación de coque en hornos cerrados, como colmenas de ladrillo, y no en pilas al aire libre a imitación de las carboneras de carbón de leña. Un cambio mucho más impor-

tante, sin embargo, fue la mejora del hierro obtenido en el alto horno de coque al refundirlo en hornos de fundición. Estos hornos habían sido usados previamente en pequeña escala tanto en Inglaterra como en Francia con el objeto de proveer de hierro para fines tales como la fabricación de balas, y el nombre de «cubilote» para una clase de horno usado en la refundición de plomo data de 1701. La refundición hacía al hierro más homogéneo y puro, y como el horno de fundición empleaba el principio reverberatorio, no había riesgo de que las impurezas del carbón utilizado como combustible se transmitiera al hierro, puesto que sólo los gases incandescentes pasaban desde la parrilla a la parte superior del horno. Un resultado de estos cambios fue el asombroso perfeccionamiento de la calidad del cañón de hierro colado de la Armada británica que, según los franceses, que lo envidiaban, no experimentó un solo reventón en veinte años: de aquí, sin duda, su invitación a William Wilkinson para levantar una fundición de cañones en Francia, que se terminó en 1785 (p. 414). Pero el uso del horno de fundición, aunque deseable, no era absolutamente esencial: en 1777 Abraham Darby hizo preparativos para fundir el primer puente de hierro profundizando el hogar de su alto horno (p. 656), en el que fundió directamente las piezas del puente.

El otro principal obstáculo al uso de coque en el alto horno lo constituía el hecho de que se quemaba con menor facilidad que el carbón de leña. El primer intento para solucionar la dificultad consistió en incrementar la energía hidráulica que movía los fuelles, hasta el punto que algunas fábricas siderúrgicas estuvieron dotadas de ruedas hidráulicas con diámetros de 9 a 12 metros. El segundo intento consistió en la utilización de cilindros soplantes accionados por agua, introducidos por John Smeaton para asegurar una combustión más completa. Pero el cambio vital llegó en 1776, cuando John Wilkinson empleó una máquina de vapor con un cilindro de un

metro para producir la corriente de aire necesaria para uno de sus hornos de Shropshire. Al cabo de cuatro años tenía cuatro máquinas para realizar este trabajo, y a finales de siglo la industria británica del hierro producía aire inyectado con veinticuatro máquinas, casi exactamente el 5 por 100 de la producción total de Boulton y Watt. La máquina de vapor no sólo acrecentó enormemente la potencia de la corriente de aire inyectado, sino que el funcionamiento del horno pudo continuar sin interrupción dondequiera que se disponía de carbón y mineral de hierro, en vez de depender del acceso a un abastecimiento de agua, con sus variaciones estacionales.

La producción británica de hierro colado llegó, de este modo, a estar muy por delante de la del resto de Europa o de la de los Estados Unidos. Como hemos visto ya, el horno de coque se introdujo por vía de ensayo en Francia en 1785 y seis años más tarde en Silesia (pp. 414-415), pero su uso fue desconocido en Bélgica hasta 1823, en el Imperio austríaco hasta 1828 y en el Ruhr hasta 1850 aproximadamente. Mientras tanto, Inglaterra extendía el uso del hierro colado desde los utensilios domésticos a la construcción (como en el puente de Coalbrookdale) y a la maquinaria. El hierro colado se utilizó, por ejemplo, en las ruedas dentadas y en los primeros martillos de fragua movidos por vapor, y en 1784 se diseñó una fábrica de harina en Londres con una planta construida enteramente de hierro colado. Sin embargo, el tipo de metal principalmente en uso era todavía el hierro forjado, siendo la aplicación del carbón mineral a su fabricación lo que explica sobre todo el asombroso crecimiento de la producción británica de fundición de hierro desde 1790 (fig. 241).

Aún existía un grave obstáculo para la plena explotación del carbón mineral por la industria del hierro. Los lingotes fabricados con coque resultaban, como ya se ha señalado, demasiado frágiles generalmente, a causa de las impurezas que contenían, para

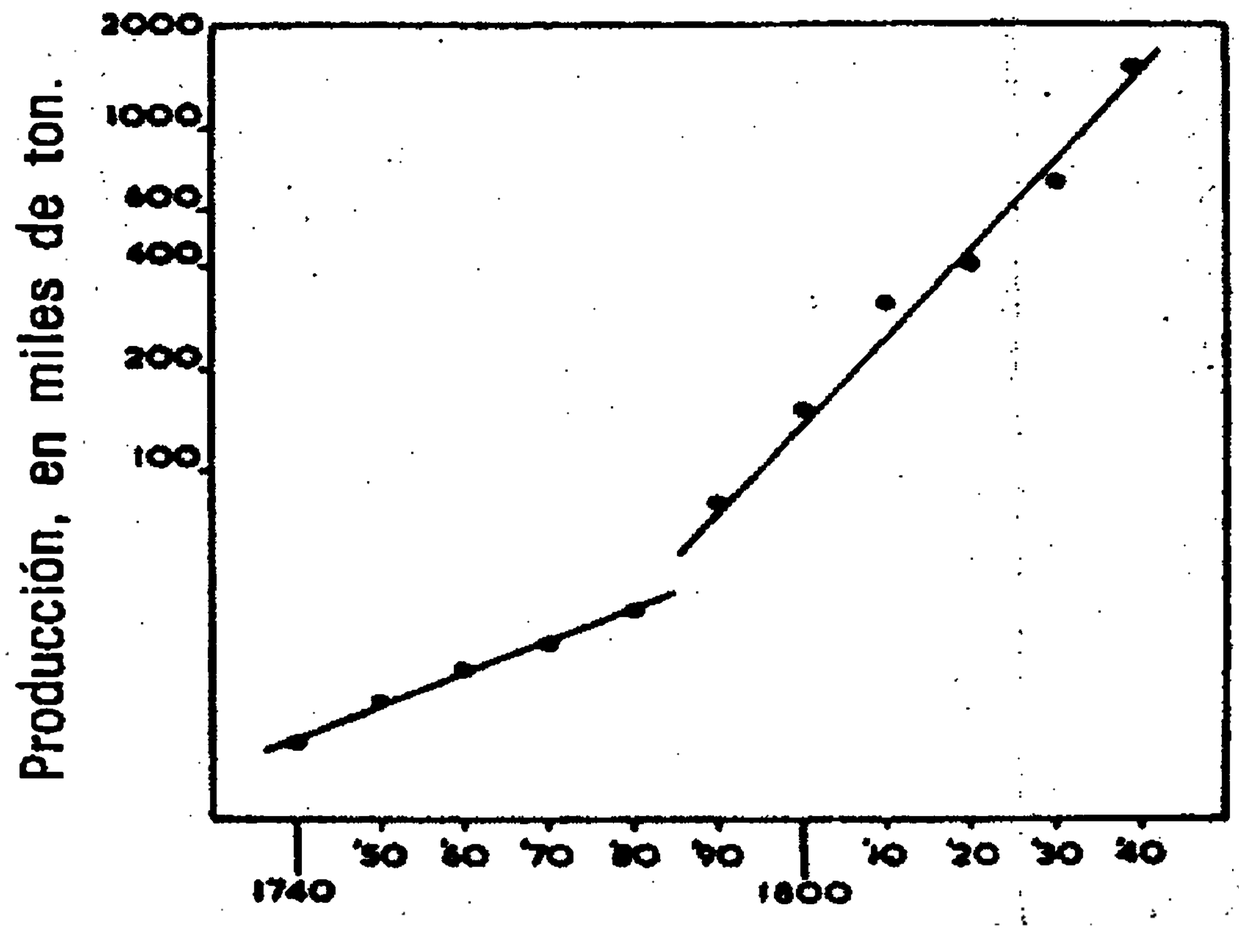


Fig. 241. Gráfico de la producción inglesa de fundición de hierro, 1740-1839.

servir de materia prima al hierro forjado. Además, comparada con el hierro en lingotes (fig. 242), la fabricación de hierro forjado utilizaba un 50 por 100 más de combustible por tonelada de producto, y el coste del combustible, el carbón vegetal que se había usado hasta entonces para este fin, crecía constantemente. Según una carta suscrita por su viuda, el segundo Abraham Darby inventó hacia 1750 un método (no especificado) «para hacer barras de hierro

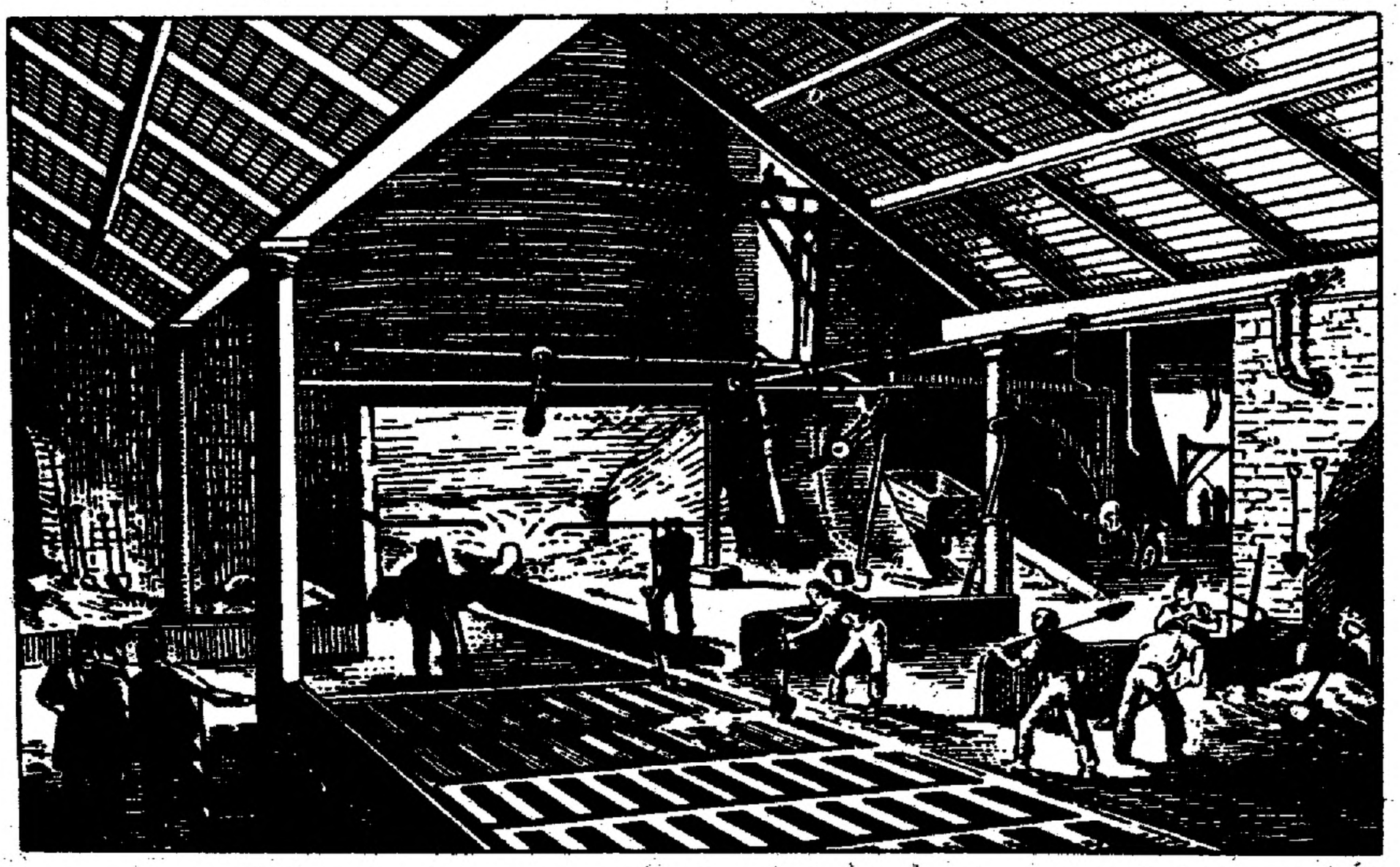


Fig. 242. Fundición de hierro en lingotes. Hacia 1850.

con fundición de carbón mineral»; pero el primer paso adelante fue dado en 1766 por dos hermanos llamados Cranage, uno de los cuales era fundidor en la fábrica de Coalbrookdale (fig. 243). Los detalles de su patente eran deliberadamente vagos, pero parece claro que producían en un horno de reverbero alimentado con carbón mineral un hierro en barras suficientemente manipulable como para satisfacer, al menos, las necesidades de los fabricantes de clavos. Es también muy posible que los Cranage se anticiparan al proceso conocido más tarde como «pu-

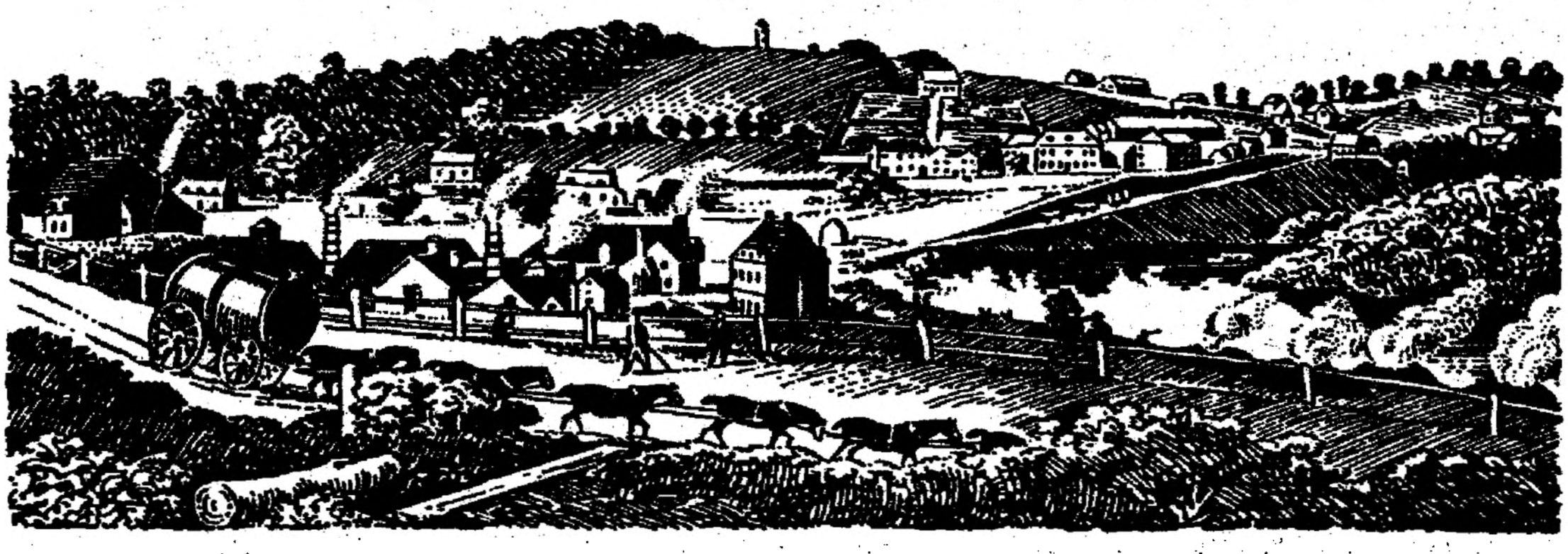


Fig. 243. Instalaciones de Coalbrookdale, mostrando el transporte de un cilindro para la máquina de Newcomen.

delado», que fue por cierto inventado por un capataz galés de una fábrica de hierro, Peter Onions, sólo unos pocos meses antes de que fuera lanzado al mundo como rasgo distintivo del nuevo proceso combinado que se asocia siempre con el nombre de Henry Cort.

Cort era propietario de una fragua y un taller de cortar planchas de metal en Fareham, cerca de Portsmouth, que trabajaba para el Ministerio de Marina, entonces gran consumidor de hierro forjado sueco. Había hecho experimentos durante años, y era conocido tanto por Boulton como por Watt, el cual le llamaba «hermano proyectista». El rasgo distintivo esencial del proceso de pudelado que inventó en

1784 consistía en «remover, apartar, batir y separar sucesivamente en el horno [de reverbero]», que daba al aire un acceso pleno y bastante rápido al hierro fundido, de modo que se descarburaba hasta el punto de hacerse maleable. Al igual que en todos los hornos de reverbero, el carbón usado como combustible no tenía ningún contacto con el metal. Fue Cort quien hizo del oficio del pudelador, que manejaba vigorosamente su barra de remover en la puerta del horno, uno de los más importantes de la industria durante los cien años siguientes (fig. 244);

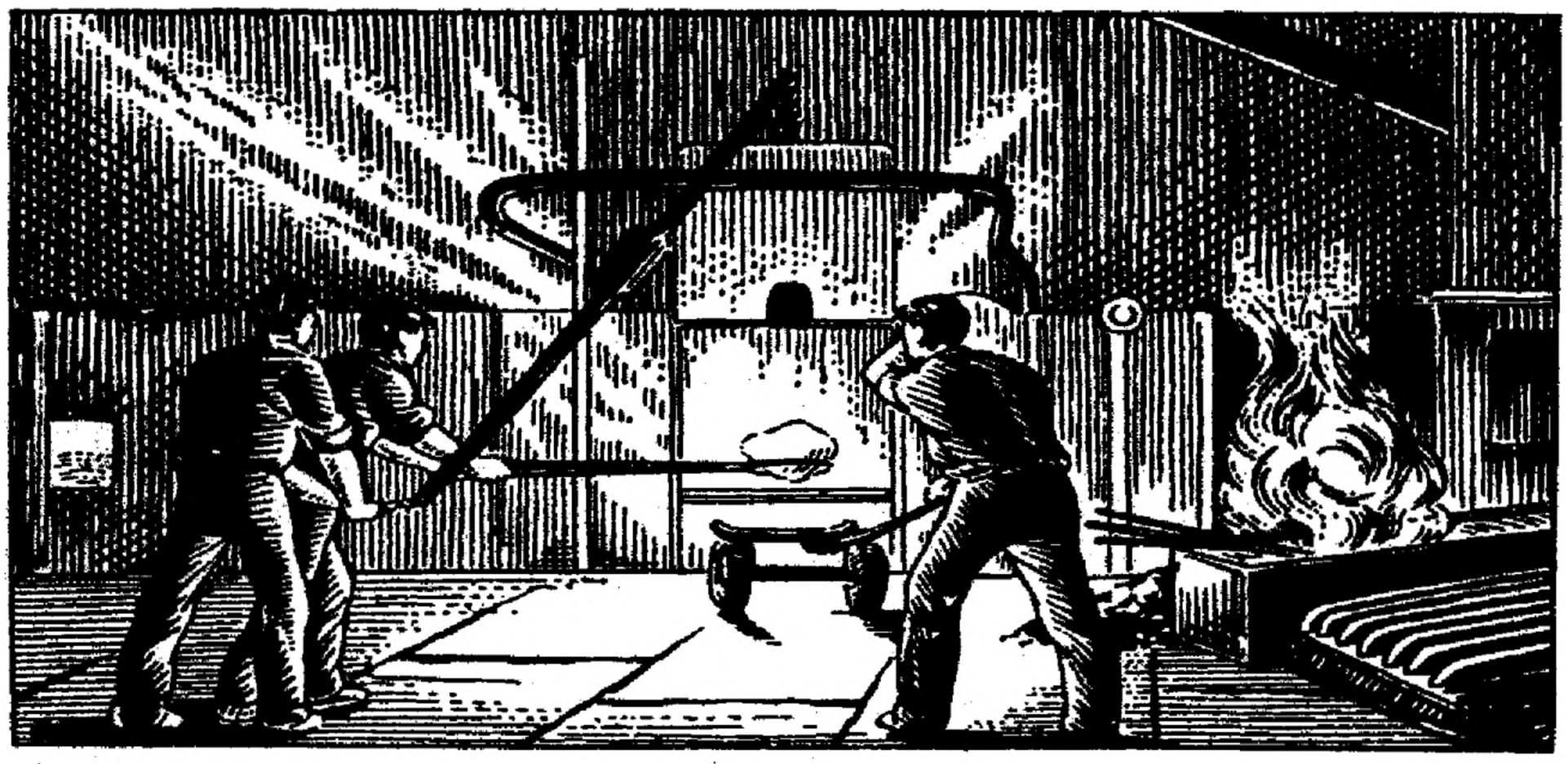


Fig. 244. Pudeladores de hierro trabajando. A mediados del siglo XIX.

el peso del metal y la temperatura a la que era manipulado quizá justifican la opinión de que ésta era la tarea más pesada de cuantas había aceptado el hombre. El éxito de Cort se vio aumentado por el hecho de que combinaba el pudelado con el uso de rodillos acanalados, en el que se le había anticipado C. Polhem en Suecia en 1745: la combinación daba por resultado grandes economías. Tan pronto como el bloque de hierro maleable alcanzaba la temperatura conveniente en el horno, a golpes de martillo se le daba la forma de zamarras, que eran trans-

formadas en barras por medio de rodillos acanalados; previamente había que hacer una plancha y luego ésta tenía que ser cortada en tiras o en barras por martilleo. Con los rodillos se obtenían quince toneladas de hierro en el tiempo que empleaba un martillo para una, de modo que el hierro pudelado compensaba por su baratura su inferioridad en calidad con respecto al hierro fundido con carbón vegetal.

La manufactura de hierro forjado, que predominaba hacia finales del siglo XVIII, sufrió una depresión temporal con el cese de la demanda de material de guerra en 1815, pero luego conoció un nuevo período de prosperidad, y hacia 1850 Inglaterra tenía una producción anual de unas 2.500.000 toneladas de hierro, incluyendo el hierro colado. Una mejora importante fue la introducción por Neilson de la corriente de aire caliente, en la fábrica de hierro de Clyde, en Glasgow, en 1829. Esta práctica se hizo de uso general rápidamente cuando se demostró que una corriente de aire precalentado, que daba una temperatura mucho más alta, era dos veces más efectiva que una corriente de aire frío; aplicada a hornos que funcionaban a una temperatura de 300° C, producía tres veces más hierro con la misma cantidad de combustible. La corriente de aire se hacía pasar por una estufa, desde donde entraba al alto horno por una tobera envuelta en un serpentín enfriado por agua para evitar su fusión: este serpentín era también un invento escocés. Esta temperatura más alta permitía utilizar carbón no lavado en vez de coque, cuestión de particular importancia para los compatriotas de Neilson porque la mayoría del carbón escocés no coquizaba bien; Escocia aprovechó también el hecho de que por primera vez era posible fundir satisfactoriamente el mineral de hierro carbonatado escocés. En otras partes, la corriente de aire caliente permitió el uso de la antracita para la fundición del hierro; este procedimiento fue patentado en América en 1833, practicado independien-

temente en el sur de Gales en 1837, e introducido efectivamente en Pensilvania por David Thomas, un inmigrante galés, tres años más tarde. Hasta 1850 no se introdujo de forma generalizada en los Estados Unidos la fundición con coque.

Mientras tanto los hornos se hicieron también mayores y más eficientes (fig. 245). La cubierta exterior se hizo redonda en vez de cuadrada y se levantó sobre pilares de hierro colado, de modo que las toberas podían insertarse todo alrededor; de la tradi-

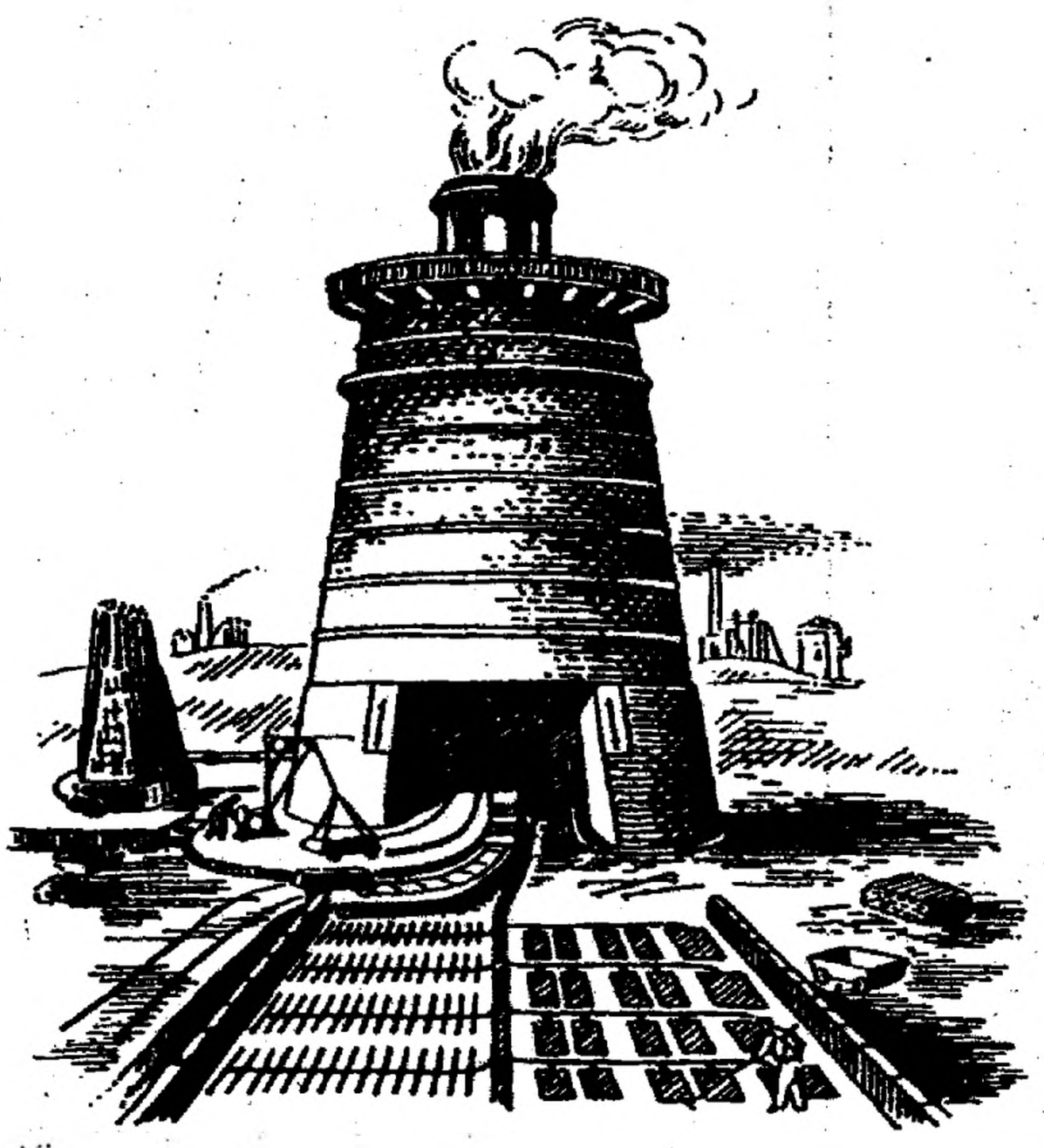


Fig. 245. Alto horno inglés, mostrando el precalentador y los moldes en que se funde el hierro en lingotes. Alrededor de 1850.

cional forma rectangular de la superficie de la plaza en que se acumulaba el metal fundido se pasó también a una forma redondeada, lo que dio por resultado una fusión más rápida con menos combustible. Para mayor economía, incluso los gases desprendidos, a los que hasta entonces se había dejado arder en las bocas de los hornos, iluminando las regiones industriales por la noche con el resplandor de un infierno, fueron captados —por primera vez en Württemberg en 1831— y empleados para precalentar la corriente de aire.

El mismo período presenció dos importantes mejoras en el proceso de pudelación. Una de estas mejoras salvó la dificultad con que tropezaba la preparación del hierro en lingotes hecho de minerales fosforados: la corrosión del lecho de arena que formaba el fondo del horno de pudelado, porque la arena y el óxido de hierro formaban una escoria demasiado ácida para combinarse con el fósforo. Un fabricante de hierro de Monmouthshire halló una solución ya en 1816, pero fue ridiculizado con el nombre de señor «Culo de Hierro» durante largo tiempo antes de que fuera reconocida la superioridad de la placa de solera de hierro colado. Otro punto débil del proceso de Cort era la lentitud del removido a mano del metal. Esto se remedió ya en 1839 revistiendo el suelo del horno con pequeñas piezas de escoria extraída del horno después de una operación previa, luego calcinada y por último enfriada. De esta manera el óxido de hierro de la escoria se combinaba con el carbono de la carga para producir monóxido de carbono bajo la superficie del metal fundido, que en consecuencia era agitado a fondo y parecía estar hirviendo. Este pudelado llamado «húmedo» elaboraba el hierro rápidamente en una sola etapa.

En el segundo cuarto del siglo XIX los pudeladores del sur de Gales desempeñaron un importante papel en la introducción de los métodos de fabricación británicos en Francia, Bélgica, Alemania y Suecia. En este último país, donde la madera era aún barata y abundante, promovieron la fabricación de chapa de hierro fundido con carbón vegetal, e introdujeron un tipo especial de horno de afinado, conocido como «horno sueco de Lancashire», aunque realmente tuvo su origen en Pontypool y no en el norte de Inglaterra. Este horno de afinado se extendió por Alemania, y con el tiempo fue reintroducido en Inglaterra bajo este nombre engañoso.

LA LLEGADA DEL ACERO BARATO

Como nos acercamos ahora al período en que la era del hierro, que había conocido un desarrollo tan largo y había llegado a un nivel técnico tan avanzado, cedió el paso a la del acero barato, que se extiende hasta bien entrado el siglo XX, será conveniente volver a los comienzos de la revolución industrial. El papel desempeñado entonces por el acero fue notablemente pequeño: este hecho es sorprendente porque ya en 1750 T. O. Bergmann, metalúrgico sueco, se había dado cuenta de la influencia de la proporción de carbono sobre el grado de dureza del acero. En el caso de este producto, la inventiva británica del siglo XVIII no produjo ninguna manufactura barata o en gran escala para inundar al continente.

En la primera parte del siglo, el acero se producía aún en Inglaterra por el procedimiento de cementación de hierro sueco en barras, de superior calidad, importado principalmente a través de Newcastle upon Tyne, a razón de unas mil toneladas por año hacia 1737. El producto primario, conocido como acero cementado, se obtenía cubriendo el hierro en barras con fragmentos de carbón vegetal y sometiéndolo a intenso y prolongado calor producido por la combustión de este mismo carbón. El acero así producido era transformado después en el acero duro requerido para la cuchillería por un ulterior tratamiento de calor y forja. Aun así, no alcanzaba la calidad absolutamente uniforme que se necesitaba cada vez más para la fabricación de relojes e instrumentos, artes que practicaba Benjamin Huntsman, de Doncaster. Huntsman consiguió fabricar un acero más puro —al principio a partir del acero cementado y duro existente, después a partir del hierro en barras sueco afinado por él mismo—, sometiéndolo a un calor más intenso. Usó para ello una cámara de fusión revestida de ladrillos refractarios, situada

en lo alto de un horno de coque. Dentro de la cámara de fusión había crisoles de 23 a 28 centímetros de altura, hechos de una arcilla especial resistente al calor; la producción de esta arcilla preocupó grandemente a Huntsman. Un intenso calentamiento de cinco horas, con la adición al acero de un fundente secreto, producía un acero colado completamente libre de partículas de sílice o escoria. El coste de producción era menor que el del acero obtenido por métodos más antiguos; la única dificultad consistía en que el producto no podía ser soldado, ya que no podía ser calentado a más de unos 900° C.

Huntsman se había trasladado a Sheffield hacia 1744, donde explotó su invento (p. 212), pero al principio los fabricantes de cuchillería consideraron su acero colado demasiado duro, aunque el metalúrgico francés Gabriel Jars, que visitó la fábrica en 1765, observó que ya se usaba para instrumentos cortantes y para las necesidades de los relojeros. Un factor que contribuyó a su difusión fue la competencia en el mercado interior de la cuchillería hecha en Francia con acero de Huntsman importado. Hacia 1787 media docena de firmas de Sheffield, por lo menos, empleaban su procedimiento de crisol, cuyo secreto se dice que fue descubierto por vez primera por un rival disfrazado de mendigo. Dado que el comercio de exportación llegaba, a través de Europa, hasta San Petersburgo, no es sorprendente que un industrial suizo. J. C. Fischer, de Schaffhausen, fuera capaz de reinventar el método de Huntsman. Fischer, que inventó también aleaciones de cobre y acero, y de níquel y acero, terminó teniendo fábricas de acero en Austria y Francia.

Sin embargo, en comparación con el hierro forjado o colado, la fabricación de acero colado era aún un proceso en pequeña escala, laborioso y caro, en el que no se experimentó ningún progreso notable en la primera mitad del siglo XIX: en 1850 la producción inglesa total era sólo de unas 60.000 toneladas. Además, este costoso material ni siquiera es-

taba exento de defectos todavía. Los Krupp adquirieron fama como especialistas en la fabricación de acero colado; sin embargo, su primer cañón, para proyectiles de 1,3 kilogramos, con un revestimiento interior de acero colado, reventó durante las pruebas realizadas en Berlín en 1849, y los expertos de artillería prusianos tuvieron grandes dudas acerca de la posibilidad de construir artillería pesada de acero. No obstante, en aquel mismo momento el problema estaba siendo resuelto en el lejano Kentucky.

Aunque William Kelly no gozó de éxito comercial, su nombre merece ser más recordado de lo que lo es, pues su carrera ilustra dos rasgos destacados de la segunda mitad del siglo XIX: la aparición de inventores americanos y el crecimiento de la industria americana del acero. Kelly fabricó calderas para azúcar destinadas a los granjeros, hechas de hierro fundido afinado en un horno de carbón vegetal, pero el coste de este carbón estaba subiendo rápidamente incluso en Kentucky. Hizo la observación casual de que una corriente de aire que actuaba sobre el hierro fundido generaba más calor si el hierro no estaba cubierto con carbón vegetal, y así aprendió empíricamente que el carbono del hierro fundido podía ser eliminado o rebajado por medio de aire sólo, actuando como combustible el propio carbono. Haciendo que quedara en el metal una proporción de carbono más alta de la que se necesitaba para el hierro forjado, se podía emplear este mismo proceso de «cocimiento por aire» para la fabricación de acero. Otros metalúrgicos pensaban que la fabricación de acero sin combustible era un absurdo, pero a partir de 1851 Kelly construyó una serie de convertidores, y su patente americana de junio de 1857 lo reconoció oficialmente como el primer inventor del nuevo acero. Pero se arruinó en el mismo año, y sus derechos fueron finalmente cedidos a Bessemer, de quien este tipo de acero toma todavía su nombre.

El objetivo de Bessemer era el mismo, como lo

prueba el título de la memoria que leyó el 13 de agosto de 1856 a la British Association for the Advancement of Science: «Sobre la fabricación de hierro y acero maleables sin combustible». Resulta claro que se abrigaban ya vivas esperanzas de lograr este resultado, como lo demuestra el hecho de que fue completamente reseñado al día siguiente en *The Times* y antes de acabar el mes había aparecido en *The Illustrated London News*. A diferencia de Kelly, Bessemer pretendía mantener el metal completamente líquido utilizando una temperatura muy alta. Sus primeros experimentos, en 1855, habían sido realizados con un convertidor vertical fijo, pero en 1860 patentó el convertidor basculante que se ha seguido usando desde entonces (fig. 246). Este convertidor basculante fue ideado para evitar la pérdida de calor colocando las toberas cónicas de arcilla refractaria en la parte superior, de modo que permanecieran fuera de acción mientras el metal fundido entraba y salía del convertidor: pero durante el verdadero

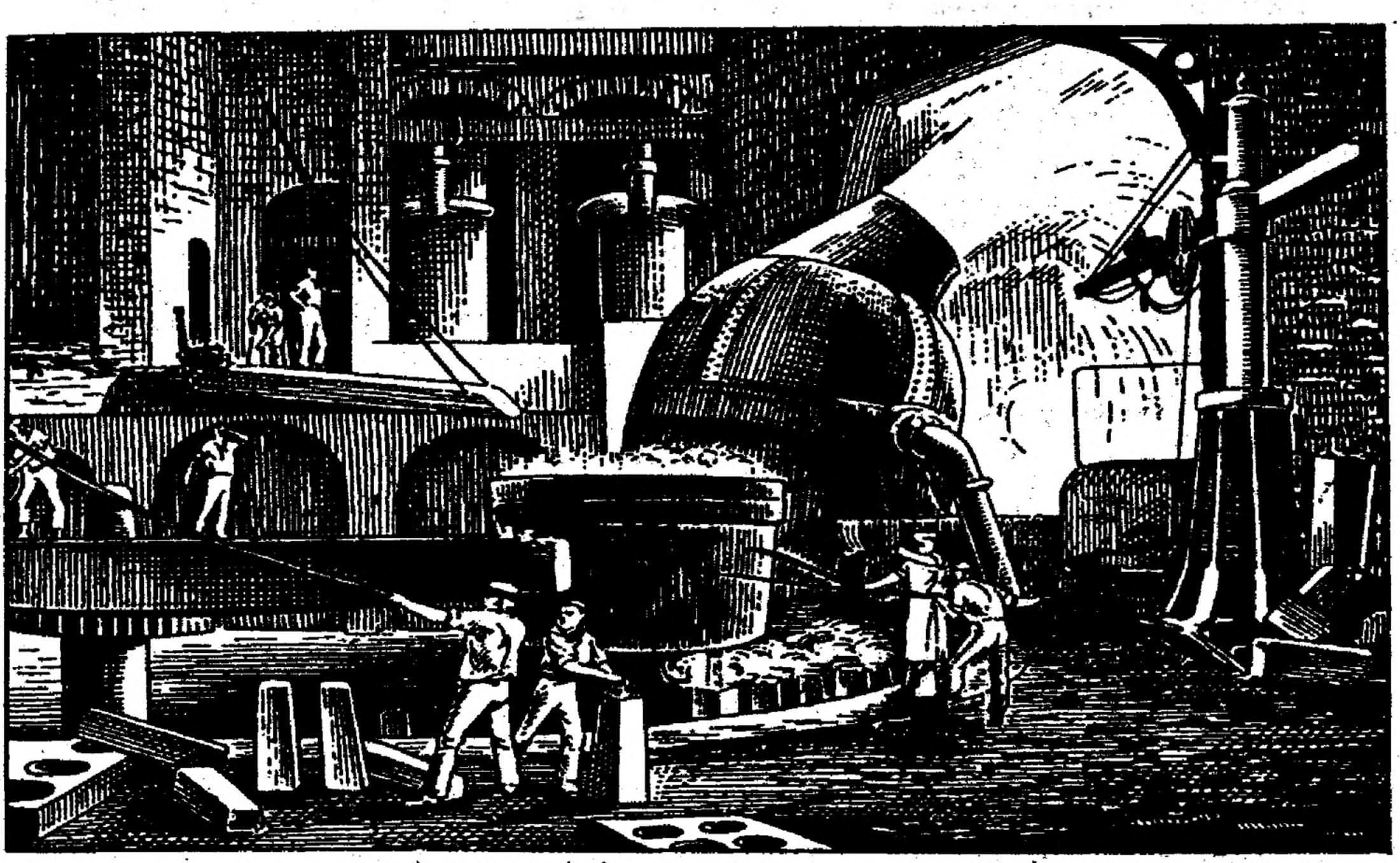


Fig. 246. Convertidor basculante Bessemer en funcionamiento.

proceso de conversión se daba la vuelta al convertidor para que las toberas quedaran al fondo, permitiendo así que la corriente de aire fuera impulsada hacia arriba precisamente a través de metal fundido. El método era rápido —hoy 25 toneladas de hierro pueden ser convertidas en acero en otros tantos minutos— aunque la corriente de aire arrastraba algo de hierro; un inconveniente de otra clase era el intenso calor a que estaban expuestos los obreros al sangrar el metal, cuestión que fue suscitada bastante tardíamente por una investigación del Home Office cerca de finales del siglo. Mientras tanto, a los diez años de ser inventado, el acero Bessemer estaba siendo soplado en Inglaterra, los Estados Unidos y por lo menos tres países del continente europeo.

Hubo, sin embargo, serias dificultades para la puesta a punto del proceso. Los primeros experimentos de Bessemer se realizaron con hierro fundido exento de fósforo, y no se advirtió al principio que no podían ser empleadas menas fosforadas comunes. Otra dificultad adicional era que el exceso de oxígeno producía burbujas en el acero, pero R. F. Mushet, hijo de un metalúrgico del Forest of Dean, descubrió que podía añadirse fundición especular (aleación de manganeso y hierro) para quitar el exceso de oxígeno y graduar la proporción de carbono del acero, dado que la proporción de carbono requerida era relativamente alta. El fabricante de acero sueco G. F. Göransson, que tenía la ventaja de disponer de una mena no fosforada muy pura del distrito de Bergslagen, en Suecia central, realizó un notable progreso en 1858, al probar la posibilidad de fabricar todos los grados de acero requeridos interrumpiendo el soplado en el instante en que se había alcanzado una proporción de carbono dada.

Mientras tanto, desde 1856 se estaba desarrollando un procedimiento alternativo, el proceso sobre solera, que hacia 1900 igualaba al proceso Bessemer

en la cantidad de acero producido, y poco después lo superaba. Este procedimiento derivaba de un invento que no estaba pensado en absoluto originalmente para la fabricación de acero, sino para mejorar la eficacia de las máquinas de vapor introduciendo un recuperador de calor. En 1856 Frederick Siemens obtuvo una patente inglesa para un proceso de regeneración, en el que los gases calientes de escape eran usados para precalentar el combustible y el aire entrantes. El principio fue aplicado por primera vez a la fabricación de hierro en el horno de Cowper de 1857, inventado por un socio de Siemens, en el que los gases residuales de alto horno se usaban para precalentar la corriente de aire. En 1861 Siemens inventó un gasógeno que permitía usar como combustible el gas derivado de carbón de baja calidad: la patente mencionaba la posibilidad de aplicar el invento para fundir acero en un horno de solera, pero tuvo su primera aplicación en una fábrica de vidrio de Birmingham.

En 1863, Pierre y Émile Martin, en Francia, usaron un horno de regeneración construido por ingenieros de Siemens para fundir barras de acero y chatarra. Y lo que es más interesante, usaron el método para obtener acero de una proporción de carbono dada fundiendo una mezcla adecuada de hierro colado, compuesta de mineral de hierro del Elba y hierro maleable: éste es el proceso Martin-Siemens. Poco después, los hermanos Siemens, primero en Birmingham y luego en el sur de Gales, hicieron acero descarburando hierro colado con mineral de hierro: éste es el proceso Siemens. El proceso sobre solera tiene tres notables ventajas: primero, permite alcanzar una temperatura de trabajo muy alta (alrededor de 1.650° C); segundo, es económico porque pueden usarse chatarra de hierro y carbón de baja calidad; tercero, es un proceso relativamente lento, por lo que se puede aplicar un estricto control.

El proceso sobre solera se desarrolló ulteriormente en los Estados Unidos, donde en 1899 Benjamín

Talbot, natural de Leeds, construía en Filadelfia los primeros hornos de marcha continua, que proporcionaban aún mayor economía de combustible; el primer empleo de este método en Europa tuvo lugar en Lincolnshire en 1902. Se aumentó también mucho el tamaño del horno y se introdujo un medio de bascularlo. En 1870, de una producción total de acero de 220.000 toneladas en Inglaterra, 115.000 toneladas se fabricaban por el método del convertidor Bessemer; treinta años más tarde el total había subido a 4.900.000 toneladas, de las que 3.156.000 toneladas se hacían por el procedimiento del horno de solera. Alrededor de dos tercios de la producción americana de acero, que totalizaba 10 millones de toneladas en 1900, era acero Bessemer, pero en aquel año Carnegie declaraba que el proceso sobre solera era el método del futuro.

Los inventos tanto de Siemens como de Bessemer requerían el uso de minerales de hierro exentos de fósforo. El medio de eliminar el fósforo fue descubierto en 1875 por un científico aficionado, S. G. Thomas, y su primo, Percy Gilchrist. Introdujeron en los ladrillos refractarios (p. 864) del convertidor y en la carga piedra caliza, con la que se combinaba el fósforo para formar escoria básica. Dado que la escoria básica pulverizada proporcionaba un valioso fertilizante, es sorprendente que el invento de Thomas no constituyera un éxito comercial inmediato. En Inglaterra, sin embargo, se prefirió hasta finales del siglo el uso del llamado «mineral Bessemer» de Cumberland y otros minerales ricos importados de Suecia y España. Pero Bélgica, Francia, los Estados Unidos y Alemania tenían todos grandes cantidades de menas fosforadas que este método hacía aprovechables para la fabricación de acero, incluyendo la mineta de Alsacia-Lorena, que había cambiado de manos en 1871. El proceso Gilchrist-Thomas duplicó, en efecto, la producción potencial de acero del mundo; hacia 1895 el acero Thomas totalizaba ya cerca de 3 millones de toneladas.

La disponibilidad de acero barato, que desde la década de 1870 encontró una creciente demanda mundial para raíles (fig. 247), estaba estrechamente ligada a los perfeccionamientos en la producción de hierro en lingotes que se utilizaba para su fabricación, así como también a las mejoras en los procesos de acabado y en el desarrollo de aleaciones de acero. Durante las décadas de 1860 y 1870 se empezaron a construir en el nordeste de Inglaterra hornos de una

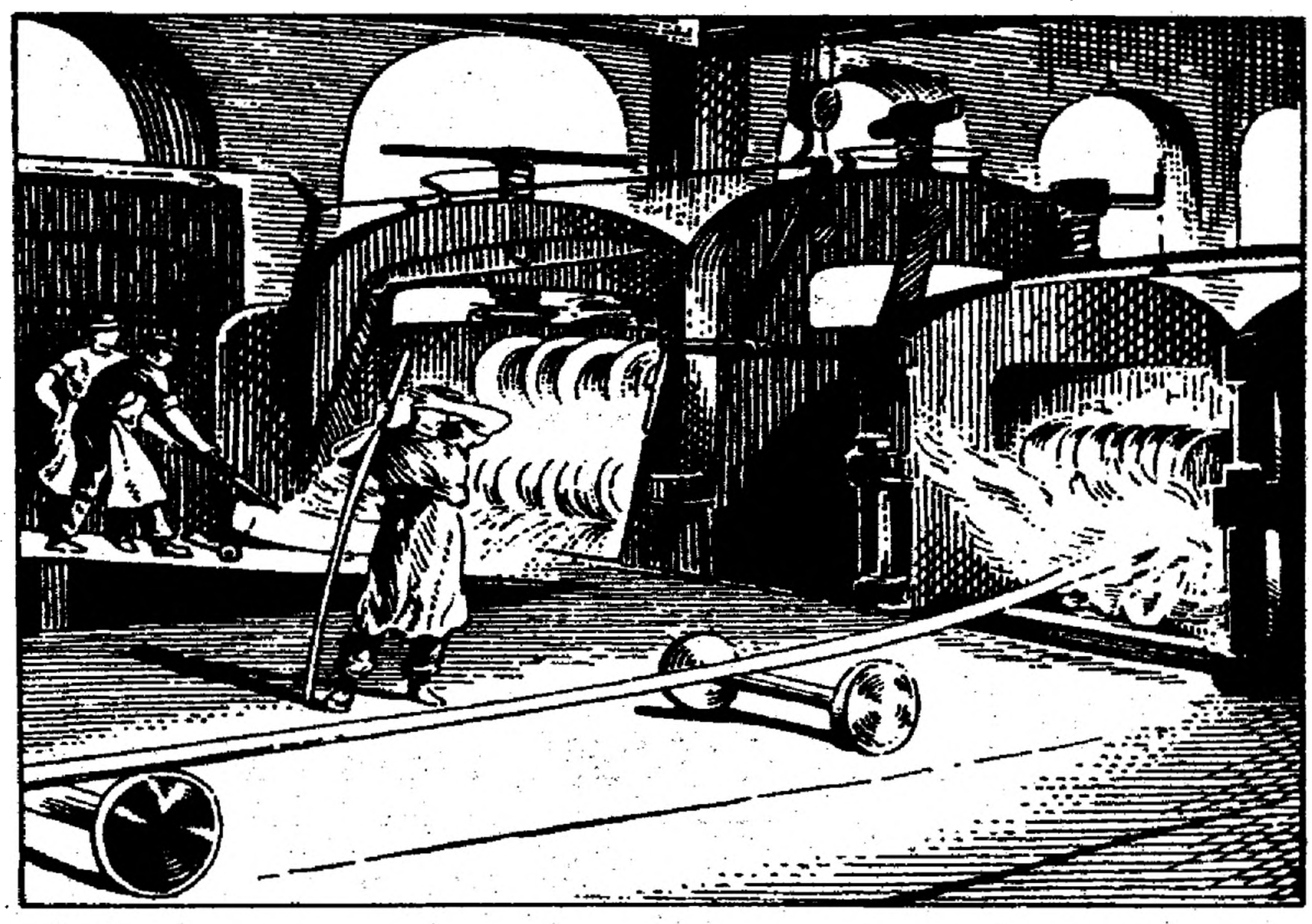


Fig. 247. Laminación de raíles de acero, 1876.

altura media de 23 metros, pero fueron los americanos quienes introdujeron la «marcha rápida» al aumentar el tamaño de la solera. En 1880 Carnegie construyó en Pittsburgo una de más de 3 metros de diámetro, que tenía espacio para ocho toberas y hacía 1.200 toneladas de hierro por semana.

En los procesos de acabado la principal mejora tuvo lugar en la técnica de laminación. Se introdujeron laminadores reversibles, que actuaban sobre el metal en ambos sentidos, evitando así la pérdida de tiempo que suponía el hacerlo retroceder tras cada

paso; laminadores trío, con un tercer rodillo o cilindro que actuaba sobre el metal en conexión con el intermedio, al tiempo que lo hacía pasar hacia atrás sin necesidad de invertir el sentido de la marcha de los otros rodillos; y trenes de laminación continuos, con juegos de rodillos dispuestos en una serie de tamaños y potencias decrecientes. Todos estos inventos empezaron a ser utilizados en Inglaterra en la década de 1860, y fueron más tarde sometidos a importantes perfeccionamientos en manos de ingenieros americanos.

Los aceros de aleación fueron producidos primero de forma accidental en la fundición de minerales mezclados, pero el acero al cromo y al níquel fueron preparados experimentalmente por Faraday ya en 1819. El desarrollo comercial, sin embargo, sólo se produjo con las necesidades de una nueva era del acero. En 1868 Mushet empezó a fabricar un acero rico en carbono aleado con tungsteno y manganeso, que no requería temple y sin embargo producía herramientas cinco o seis veces más duraderas; en el invento del acero aleado con tungsteno se le había anticipado más de diez años, sin embargo, un austriaco, F. Köller. El acero al cromo para planchas de blindaje y proyectiles empezó a producirse comercialmente en Francia en 1877. El acero al manganeso, endurecido por temple en agua a una temperatura de 1.000° C, fue descubierto por (Sir) Robert Hadfield, natural de Sheffield, en 1882, y el acero al níquel fue comercializado en Le Creusot en 1888. Finalmente, F. W. Taylor preparó en Filadelfia un acero rápido, que se volvía más duro cuanto más de prisa cortaba.

La producción mundial de acero pasó de 500.000 toneladas en 1870 a 28 millones de toneladas en el último año del siglo. La parte del león en este tremendo crecimiento correspondió a los Estados Unidos, que empezaron dicho período produciendo una cuarta parte de lo que producía Inglaterra y terminaron produciendo dos veces más (p. 706). Casi igualmente sorprendente fue el crecimiento de la indus-

tria alemana de fabricación de acero, que a finales de siglo fabricaban 8 millones de toneladas por año, más cerca del total americano que del británico.

EXPLOTACION DE METALES NO FERREOS (1750-1900)

El meteórico aumento del uso del acero en el último cuarto del siglo XIX, con sus enormes consecuencias sociales, es paralelo, en alguna medida, al aumento de la producción mundial de metales no férreos. Por ejemplo, la producción de los seis principales metales comunes pasó en ese período de 268.000 a 1.955.000 toneladas métricas. Pero entre 1750 y 1850 su crecimiento había sido lento, y hay comparativamente pocos cambios tecnológicos que registrar. La mayor parte de la actividad minera continuaba desarrollándose en las zonas tradicionales de Inglaterra, Suecia, Bohemia y España, por lo que la prospección no desempeñó un papel muy importante. Por el contrario, la disponibilidad de bombas de vapor de rendimiento creciente hizo posible con frecuencia volver a explotar minas inundadas, como en el caso de las minas de cobre de Cornualles; en 1798 se estaban utilizando en este lugar cuarenta y cinco máquinas de Boulton y Watt, aunque la antigua bomba de cangilones, movida a mano, no había desaparecido aún del todo.

El método general de laboreo de metales era casi el mismo que el del carbón, con la misma distribución de un área dada en bloques rectangulares; pero como los filones corren por lo general más de forma vertical que horizontal, el método usual de extracción consistía en trabajar hacia abajo o hacia arriba en una serie de escalones (fig. 248). En comparación con una mina de carbón, la distancia del frente de arranque al pozo era de ordinario corta, y los gases venenosos y explosivos eran extremadamente raros. Los mineros del Harz practicaban la antigua costumbre de dejar hogueras encendidas durante el fin de

Fig. 248. Laboreo a niveles descendentes. Principios del siglo XIX.

semana, como preparación para romper por enfriamiento rápido la superficie de la roca al echar agua sobre ella cuando reemprendían el trabajo de la semana (fig. 249).

La extracción de metales a partir de sus menas continuó haciéndose también en su mayoría de modo tradicional. El oro todavía se lavaba simplemente a partir de la arena o grava que lo contiene, y la plata

Fig. 249. Calentamiento previo de rocas para partirlas por enfriamiento al echarles agua encima.

se separaba del cobre y del plomo después de la fusión. En 1863, sin embargo, H. L. Pattinson, natural de Newcastle upon Tyne, patentó un nuevo procedimiento para extraer plata a partir del plomo, eliminando los cristales de plomo puro de la superficie de una serie de crisoles de hierro colado donde se fundía plomo argentífero, que era removido mientras se enfriaba, hasta que finalmente un crisol proporcionaba metal con un contenido de unos 8,5 kilogramos de plata por tonelada. Este procedimiento conseguía una recuperación de plata mucho mayor. El cobre, el plomo, el cinc, el estaño y el mercurio se producían todos fundiendo las menas con carbón vegetal o mineral, y existían varias adaptaciones de altos hornos y hornos de reverbero, como en el caso del hierro. El cobre puede tomarse como ejemplo, ya que Inglaterra en este tiempo desempeñó un importante papel tanto en su laboreo —en los años 1780 Anglesey tenía en la montaña de Parys la mayor mina de cobre del mundo— como en su fundición, que se concentraba en el sur de Gales y Lancashire, al mismo tiempo que la Armada inglesa se contaba entre sus principales usuarios; los primeros peniques de cobre, acuñados en 1797, pesaban 28 gramos.

Se realizaban seis operaciones principales. El mineral se tostaba primero durante doce a veinticuatro horas, y se enfriaba con agua. Luego se fundía con escoria de una fase posterior, se granulaba en un tanque de agua, se calcinaba a una temperatura gradualmente creciente, se fundía de nuevo con más cantidad de escoria y se sacaba del horno para formar lingotes (fig. 250). El calentamiento de estos lingotes con libre acceso de aire en un horno de fusión producía cobre *blíster* (con ampollas o vesículas). Pero para obtener un cobre refinado apropiado para la industria tenía que ser fundido de nuevo el cobre *blíster* para suprimir la escoria que había escapado a la eliminación previa, y el producto final se endurecía añadiéndole carbón vegetal o antracita, siendo

mejorada la acción reductora removiendo el metal fundido con una vara de madera verde.

El cobre se usaba de muchas formas. Había, por ejemplo, la «plata de Sheffield», que Thomas Bolsover, el cuchillero de Sheffield, produjo por primera vez alrededor de 1742 para hacer botones. Se fabricaba fundiendo o soldando hojas delgadas de plata a cada lado de una hoja gruesa de cobre y laminan-

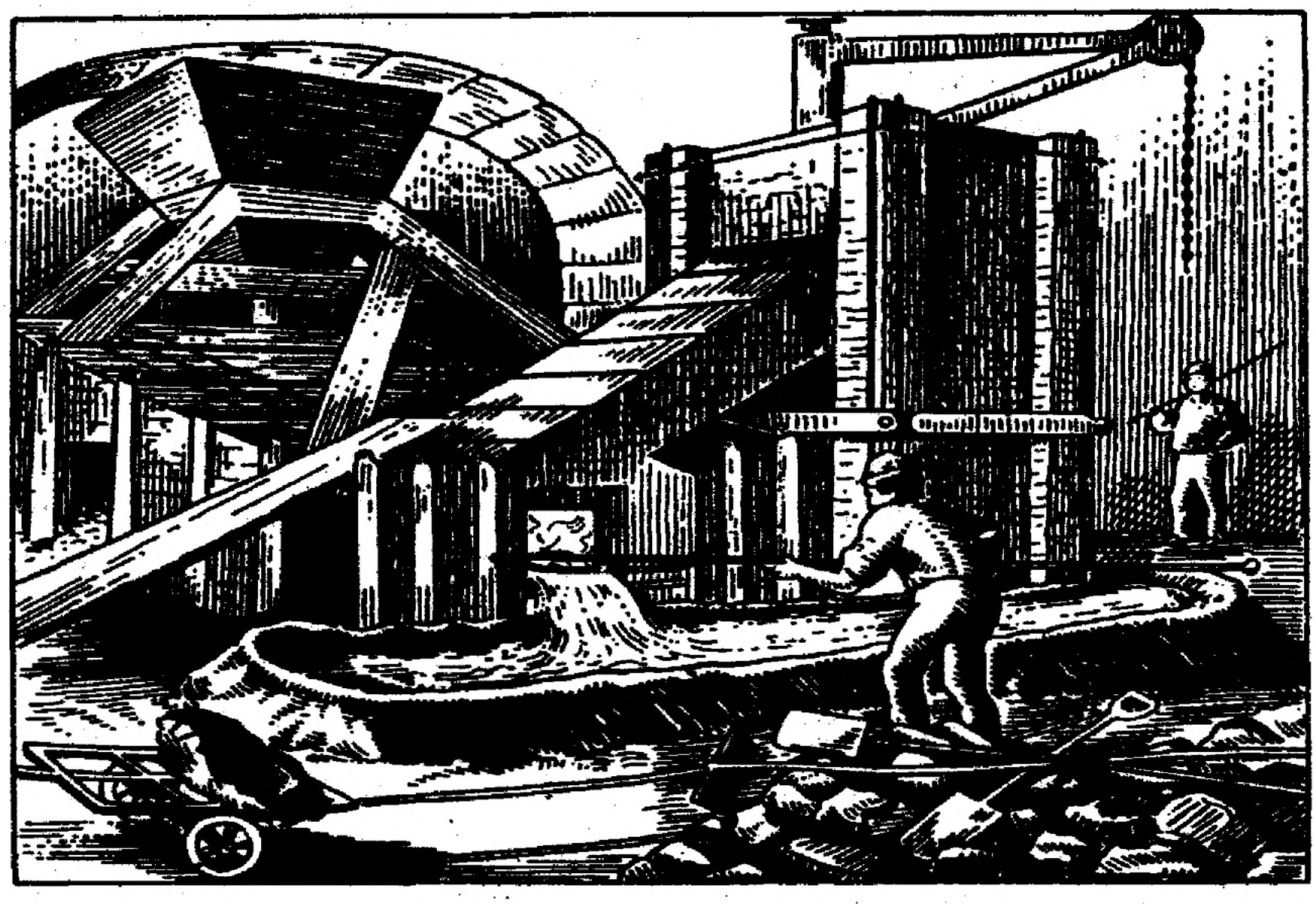


Fig. 250. Fabricación de lingotes de cobre, Lancashire. Siglo XIX.

do luego la combinación hasta formar una hoja delgada. Como tenía la apariencia de plata pura por un precio más bajo, su uso se extendió rápidamente a artículos tales como servicios de té y café y candelabros, especialmente cuando Matthew Boulton y otros introdujeron una técnica de soldadura con hilo de plata para cubrir el cobre que quedaba al descubierto en los cantos. Un invento realizado en Birmingham fue el metal de Muntz (tres partes de cobre por dos de cinc), que después de 1832 sustituyó el forro de

cobre de los cascos de los barcos en la flota mercante. Casi todas las clases de latón contenían, sin embargo, mayor proporción de cobre, ya que éste era apreciado por su hermoso color, parecido al oro. También en esto llevó la delantera Birmingham, que en 1795 utilizaba mil toneladas al año. Otros objetos de oropel tales como botones, etc., se producían a partir de lo que se llamaba «latón de calamina», que no era una aleación directa de cobre y cinc, sino que se obtenía calentando cobre con calamina y carbón vegetal. Se utilizaban también mucho los ácidos, la sangre de drago (una clase de resina) y la laca para variar o disfrazar el aspecto superficial de los muchos artículos de imitación, gracias a los cuales se estaba haciendo famoso Birmingham.

La investigación química fue revelando la existencia de nuevos metales, pero los fabricantes en general no estaban muy interesados en desarrollar su uso, especialmente porque la extracción y el laboreo eran a menudo difíciles: en fecha tan tardía como 1828, S. F. Gray, en *The operative chemist*, descartaba desdeñosamente varios de ellos como meras suposiciones hipotéticas, añadiendo su propia opinión de que «nada sino la manía de la época por la invención de los nuevos metales podía haber sugerido su inserción en la lista». Los metales del grupo del platino, el cobalto y el níquel fueron sin embargo efectivamente estudiados en el siglo XVIII y llegaron a ser asequibles comercialmente.

Al platino de las minas sudamericanas no se le había hecho caso durante generaciones por considerarlo inservible, hasta que el navegante español Antonio de Ullŏa, que acompañó a una expedición francesa al Perú, lo describió en Europa en 1736. Los químicos idearon un procedimiento basado en una solución de agua regia para separar el platino de los metales que se encuentran en él y de otras impurezas; resultaba un polvo negro, que con dificultad podía ser prensado, batido en hojas y forjado. Desde 1824 se explotó un yacimiento en la vertiente oc-

cidental de los Urales que suministraba la base para la fabricación en San Petersburgo. En Europa y en sitios tan alejados como Borneo se hallaron otros yacimientos que añadir a los originarios suministros de América. Aunque su nombre es un diminutivo de la palabra española plata, el platino no se usó al principio en joyería, pero su excepcional resistencia a la corrosión lo hizo valioso para algunos tipos de materia de laboratorio, tales como crisoles, y especialmente para los rectificadores de ácido sulfúrico usados en la industria: con la fabricación de grandes recipientes industriales de platino maleable está particularmente asociado el nombre de W. H. Wollaston.

El cobalto fue obtenido en 1733 por el químico sueco Georg Brandt —del mineral de cobalto (el óxido del metal), que había sido empleado durante mucho tiempo para hacer vidrio azul— y fue usado principalmente para reconvertirlo a su óxido en forma más pura, que asimismo era solicitado sobre todo para la fabricación del vidrio. El níquel fue obtenido por otro químico sueco, Axel Cronstedt, a partir del *Kupfernickel* o falso cobre, mineral hallado en Alemania y Noruega. El *Kupfernickel* era tostado para eliminar el arsénico, disuelto en ácido, y tratado nuevamente para eliminar las impurezas. El propio níquel era utilizado principalmente en aleaciones, en especial la alpaca, nombre dado a una variedad de aleaciones en las que un 15 a un 34 por 100 de níquel se combinaba con cobre y una proporción más pequeña de cinc; la calidad era tanto mejor cuanto mayor el contenido de níquel. Desde 1840 la alpaca fue considerada un material particularmente apropiado para el nuevo proceso de galvanoplastia con plata y otros metales (p. 727), cuya popularidad contribuyó a desplazar la moda de la «plata de Sheffield».

En la segunda mitad del siglo XIX la explotación de metales se aceleró mucho a consecuencia de la enorme demanda industrial y comercial que había que satisfacer. Se produjo, por tanto, una búsqueda mundial de yacimientos, intensificada a intervalos

por los grandes beneficios que resultaban de algunos descubrimientos afortunados. Al mismo tiempo, la pericia de químicos e ingenieros mejoró enormemente la extracción y el laboreo de metales: los métodos eléctricos, por ejemplo, llegaron a ser importantes hacia finales del siglo.

Los grandes descubrimientos de nuevos yacimientos de minerales, que afectaron a la vida económica de todo el mundo en este período, parece que se debieron más a la casualidad que al desarrollo de nuevas técnicas de prospección sugeridas por la teoría geológica. Esto es cierto no sólo para las grandes minas de oro de California y Australia, y las de diamantes de Kimberley, en Africa del Sur, sino incluso para riquezas tan evidentes como los yacimientos de plomo y cinc de Broken Hill, en Nueva Gales del Sur, que forman un visible cerro negro que emerge sobre una llanura muy frecuentada por pastores de ovejas.

La prospección sistemática recibió, sin embargo, un gran impulso con la utilización de nuevos equipos. Las rocas blandas se taladraban con barrenas rotatorias, las rocas más duras a golpe de cincel. La torre de perforación fue perfeccionada a partir de su uso como grúa en los barcos para facilitar la retirada del equipo completo de herramientas de barrenar sin necesidad de desmontarlas. Cuando se necesitaban muestras de los estratos perforados se empleaba una columna de piezas tubulares mecánicas, a la que se dotaba de un «abrasivo» más potente y duradero utilizando diamantes industriales; a medida que esta columna iba penetrando cortaba un cilindro de roca que era retenido en el tubo y podía ser subido para su examen. Se realizaron avances paralelos en los métodos de barrenado subterráneo. Se empezaron a hacer agujeros de barreno para colocar cargas explosivas perfeccionadas con una máquina de barrenar rocas, que se comenzó a usar cuando se estaba construyendo el túnel del ferrocarril del Mont Cenis (p. 669) en la década de 1860. Más tarde se idearon máquinas neumáticas más eficaces, que se podían

manejar a más de un kilómetro del compresor. Pero si bien en las cuencas mineras más avanzadas mejoraban constantemente los métodos más ventajosos, sería ilusorio suponer que la extensión de la industria minera a todas las partes del mundo, tan característica de este período, no significó una continua dependencia del músculo y de los recursos individuales. El descenso a una mina australiana, por ejemplo, podía realizarse aún en la década de 1870 por la aplicación del principio del contrapeso al anticuado malacate, que permite a un hombre trabajar solo.

Un nuevo problema creado por la creciente demanda mundial de metales fue el de cómo encontrar la forma de concentrar los yacimientos primarios de mena de bajo contenido de metal, que tenían que ser usados cada vez más al irse agotando los ricos yacimientos secundarios cercanos a la superficie. Se hicieron varias mejoras en el antiguo procedimiento del lavado —ya altamente desarrollado en la Suecia del siglo XVIII (fig. 251)— o separación de la mena. Una de estas mejoras consistió en una mesa de sacudidas, que hacía más fácil mantener la ganga suspendida en el agua mientras las partículas de la mena relativamente más pesadas caían al fondo; graduando la profundidad de una serie de canales por los que pasaba el agua sin parar era posible también

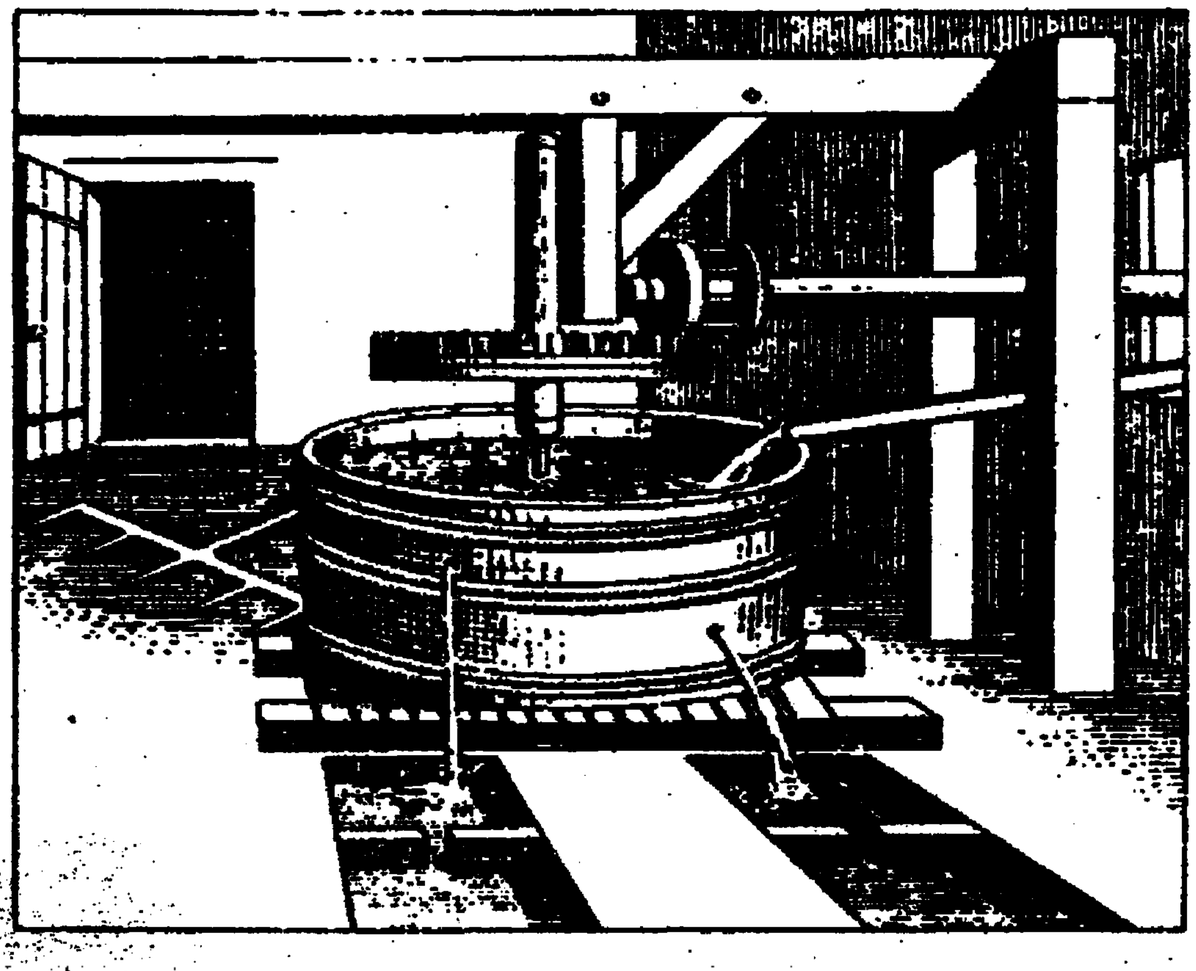


Fig. 251. Concentración mineral de cobre por lavado, de Swedenborg, *Regnum subterraneum*, 1734.

clasificar el residuo según la pureza del metal. Un método enteramente nuevo, desarrollado a finales del siglo XIX, fue el uso de un potente electroimán que separaba fácilmente en el mineral finamente triturado los materiales férreos de los no férreos; más tarde fue adaptado para separar minerales que se distinguían sólo por una ligera diferencia en sus propiedades magnéticas. Por último, existía un proceso conocido con el nombre de flotación, que se aplicó primero al mineral sulfuroso pobre en 1860: el mineral se mezclaba con agua y un aceite viscoso, con lo cual las partículas de sulfuro eran absorbidas por el aceite y gran parte de las impurezas podían ser arrastradas por el agua. Pero este método utilizaba mucho aceite, y hasta 1901, en Broken Hill, no se explotó el método moderno, en el que se usa menos aceite, se agita la mezcla por medio de aire y se emplean burbujas de aire para llevar a la superficie las partículas de mena.

Los cambios en la tecnología de la extracción pueden ejemplificarse con el cobre, que era el segundo metal en importancia después del hierro, y fue el primero que se afinó electrolíticamente a escala industrial; además, la fundición de cobre es el primer ejemplo de industria en que Inglaterra llegó a perder la primacía que tenía bien establecida. Al principio del siglo XIX las tres cuartas partes del cobre del mundo se fundían en el sur de Gales. A mediados de siglo Swansea era aún el verdadero centro de la industria mundial del cobre; y, sin embargo, de los 600 hornos que funcionaban allí en 1860, el último se extinguió en 1921. La causa básica de este gran cambio no fue la superioridad de la tecnología extranjera, sino el hecho de que al descubrirse nuevas fuentes de suministro en España, Chile y Norteamérica, resultaba indiscutiblemente más ventajoso extraer el mineral, fundirlo y afinarlo en el mismo sitio y a una escala proporcionada a los nuevos e inmensos espesores de la mena. En las dos últimas décadas del siglo, Arizona y Montana juntas producían casi

la mitad del cobre del mundo y suministraban la base natural para los principales avances en la tecnología. El sur de Gales, en consecuencia, se interesó más por la fabricación de derivados. Durante generaciones los alrededores de Swansea se habían contaminado con el llamado «humo de cobre», que contiene dióxido de azufre, pero en 1865 empezó a instalarse un nuevo tipo de horno para obtener ácido sulfúrico como valioso derivado; a partir de estos comienzos nació una extensa industria de productos químicos pesados. Swansea empezó también a recurrir a la fundición de minerales de níquel y cinc y a los nuevos métodos de extracción de metales preciosos.

Un ingenioso cambio en la extracción de cobre lo constituyó la introducción del horno de tostación de varias soleras. El mineral se introducía por la parte superior y era arrastrado por brazos rotatorios de forma alternativa hacia el centro y hacia la periferia de sucesivas soleras, de manera que caía de una a otra; una sola operación reducía la proporción de azufre tanto como varios días de tostación lenta por el método antiguo. Se necesitaba una posterior eliminación de azufre y hierro para convertir este producto, conocido como mata, en el cobre *blister*, con un 98,5 por 100 de pureza. Esta operación se realizó desde 1880 en el convertidor de soplado lateral, imitación directa del convertidor Bessemer. Pero aunque este producto, cuando se convertía en metal refinado (p. 711), era adecuado para todos los usos más antiguos, incluyendo las cajas de fuegos de las locomotoras, no era lo bastante puro para actuar como conductor eléctrico satisfactorio: el cable transatlántico de 1858, por ejemplo, estaba hecho de cobre, que tenía sólo la mitad de la máxima conductividad posible.

En este caso la nueva industria eléctrica produjo por sí misma la solución, pues la patente de J. B. Elkington de 1865 fue obtenida para afinar placas de cobre *blister*, suspendiéndolas como ánodos en cubetas que contenían una solución saturada de sulfato

de cobre, por la que se hacía pasar una corriente eléctrica: en el cátodo se depositaba cobre puro. Este refino electrolítico no sólo producía un cobre que era un conductor eléctrico satisfactorio, sino que del sedimento anódico se obtenía plata, oro y otros metales, como valiosos derivados. La primera planta de refino electrolítico se construyó cerca de Swansea, pero el procedimiento se extendió por América en 1892; su emplazamiento estuvo determinado en general por la disponibilidad de electricidad barata. A final del siglo el método de Elkington permanecía básicamente inalterado, excepto que llegó a ser práctica común usar cobre refinado en lugar de cobre *blister* para los ánodos.

El desarrollo del suministro mundial de níquel se produjo a través de dos fases. En la primera de éstas el níquel llegó a ser un metal asequible por haberse descubierto grandes yacimientos, primero en Nueva Caledonia en 1865 y luego en Sudbury, Ontario, durante la construcción del ferrocarril canadiense del Pacífico en 1883. La separación era difícil y la demanda pequeña, hasta que James Riley demostró en 1889 el valor del níquel en los aceros de aleación (p. 708). Por entonces fueron puestos a punto dos nuevos procedimientos de extracción. El procedimiento de «capas superiores e inferiores» implicaba el añadido de sulfato de sodio (p. 777) y coque a una mezcla fundida de níquel y cobre que se vertía en grandes crisoles, donde el sulfuro de cobre se separaba en una capa que flotaba encima del sulfuro de níquel, relativamente más denso; se dejaba solidificar y se separaban después las dos partes con un macho. Se repetía el tratamiento y la llamada «segunda capa inferior» contenía níquel al 72 por 100. Después de una nueva elaboración el afino final se efectuaba electrolíticamente. El otro procedimiento, inventado en la década de 1890 por el fértil cerebro de Ludwig Mond, estaba basado en su descubrimiento casual de que el monóxido de carbono reacciona con el níquel caliente para formar carbonilo de ní-

quel gaseoso, que puede descomponerse a una temperatura aún más alta para formar níquel puro. Este método se usaba después de separar la mayor parte del cobre por el procedimiento anterior; producía níquel de una pureza del 99,95 por 100, y fue puesto a punto al acabar el siglo.

En 1887 se descubrió que podría usarse una solución muy diluida de cianuro potásico o sódico para la extracción de oro por el procedimiento Forrest-MacArthur, que se podía aplicar económicamente a material tan pobre como la cuarcita, en la que el oro se encontraba diseminado en cantidades muy pequeñas. El procedimiento era económico aunque la cantidad de oro ascendiera sólo a siete gramos por tonelada, y fue después de este descubrimiento cuando Africa occidental y el Rand se convirtieron en las principales fuentes de suministro; para el afino final se introdujeron métodos electrolíticos. Este procedimiento fue de gran importancia en un período en que el dinero en circulación, el crédito y el desarrollo de grandes mercados de productos chapados en oro dependían todos de la disponibilidad de este metal.

Por último, un nuevo metal fue reconocido por vez primera —aunque se sospechaba su existencia desde poco después de 1700— y producido comercialmente en el espacio de medio siglo. Este nuevo metal fue el aluminio, del que F. Wöhler obtuvo glóbulos diminutos en 1845. Fue más atentamente estudiado poco después por el químico francés H. E. Sainte-Claire Deville, bajo el patrocinio del emperador Napoleón III, que encargó cucharas de aluminio para los banquetes de Estado y un sonajero para el Príncipe Imperial. El procedimiento de Deville constaba de dos etapas. En la primera, la bauxita, mineral que contiene un 50-65 por 100 de alúmina (óxido de aluminio), se hacía reaccionar con sosa cáustica; la alúmina así purificada era calentada en una corriente de cloro para producir cloruro de aluminio. En la segunda etapa se hacía pasar hidrógeno por el cloruro de aluminio, y el vapor formado era conducido

a recipientes que contenían sodio líquido, que reducía el cloruro a aluminio metálico. El sodio, que era la materia prima más cara de este proceso, costaba en aquella época al menos 18 chelines los 100 gramos, y durante treinta y tres años de fabricación el precio del aluminio de Deville no bajó nunca de 11 chelines los 100 gramos: por eso su uso se limitaba a artículos de lujo. La situación persistió, pues aunque Deville ideó más tarde un procedimiento potencialmente mejor, basado en la fabricación de sodio a bajo precio reduciendo sosa cáustica a alta temperatura con carbón vegetal, no pudo vencer los obstáculos técnicos. El primero en explotar satisfactoriamente este procedimiento fue un químico americano, H. Y. Castner. No habiendo logrado interesar a los industriales americanos, se trasladó a Inglaterra, donde inició la fabricación de sodio para la extracción de aluminio en Oldbury en 1888. Planeó fabricar 45.000 kilogramos de aluminio al año utilizando sodio producido a 2 peniques los 100 gramos, y acababa de vencer las dificultades iniciales cuando el camino del éxito fue inesperadamente obstaculizado por el desarrollo de un proceso electrolítico mucho más barato.

En 1886 C. M. Hall en América y P. L. T. Héroult en Francia inventaron, independientemente, el método moderno de fabricación de aluminio por electrólisis de la alúmina disuelta en criolita fundida (otro mineral que contiene aluminio, extraído en Groenlandia pero más tarde fabricado sintéticamente). Para obtener una tonelada de aluminio de este modo se necesitan de 18.000 a 20.000 kwh. de electricidad: como en todos los otros procesos electrolíticos en gran escala, el coste de la electricidad era un factor importante. La primera instalación para estos fines utilizó energía eléctrica procedente de los saltos de agua de Schaffhausen en el Rin, y aunque Francia, Norteamérica y Gran Bretaña adoptaron el proceso en seguida, los suizos fueron durante muchos años los principales productores de este metal. Contribu-

yó mucho a la producción comercial el hecho de que, poco después del descubrimiento del procedimiento electrolítico, K. J. Bayer mejoró grandemente el método preliminar de afino de la bauxita con sosa cáustica.

NUEVOS PRODUCTOS METALICOS

Aunque a finales del siglo XIX se inició la era del acero —en 1900 la producción mundial de acero suave era de 28 millones de toneladas, mientras la de cobre era de 500.000—, la obtención de otros metales y de diversas aleaciones continuó siendo tan importante como para justificar un breve repaso de los productos de las industrias metalúrgicas en general; la historia de los armamentos desde 1750, sin embargo, se considerará por separado.

El incremento de la escala de fabricación permitió producir lingotes de mayor tamaño, que en el caso del acero suave fabricado por el procedimiento de solera podían alcanzar un peso de cinco toneladas; el cobre se fundía normalmente en lingotes de dos toneladas. Los aceros especiales, los latones, la alpaca y otras aleaciones, en cambio, se fundían aún en crisoles con una capacidad inferior a los 90 kilogramos de metal y se vertían luego a mano en moldes. A continuación se les aplicaban tratamientos de forja, laminado, prensado y estirado, soldadura y galvanoplastia.

El uso del martinete, que se hizo mucho más fácil por la aplicación en 1842 del martillo-pilón inventado por Nasmyth (véase fig. 162), siguió siendo esencial para dar forma al hierro forjado antes de ser laminado mientras ese metal fue de uso común. Pero a finales del siglo XIX la forja, en gran parte martillada a mano, era sobre todo necesaria en la industria del cobre para dar la forma final a las chapas laminadas, que hacia 1870 podían ser de dos toneladas

de peso. El laminador, por otra parte, desempeñó un papel principal en la producción de barras, chapas y perfiles para la construcción, chapas para los nuevos barcos de hierro y acero, chapas para calderas y raíles para los ferrocarriles en continua expansión. El laminador trío ha sido descrito ya (p. 708). En 1884 empezó a ser sustituido por el laminador universal, que con su enorme potencia podía partir de un lingote de acero colado sin martillar y convertirlo en una chapa o una barra de la anchura requerida: ésta fue la respuesta final al problema de cómo producir plancha gruesa de blindaje para barcos. En 1861 se hizo una plancha de 305 milímetros de grosor y 20 toneladas de peso laminando juntamente dieciséis planchas de hierro forjado de 31,75 milímetros fabricadas por separado (fig. 252). Al acabar el siglo, sin embargo, los Krupp podían laminar un lingote de acero de 130 toneladas de peso y 914 milímetros en una plancha de 305 milímetros de espesor que medía 13 × 3 metros.

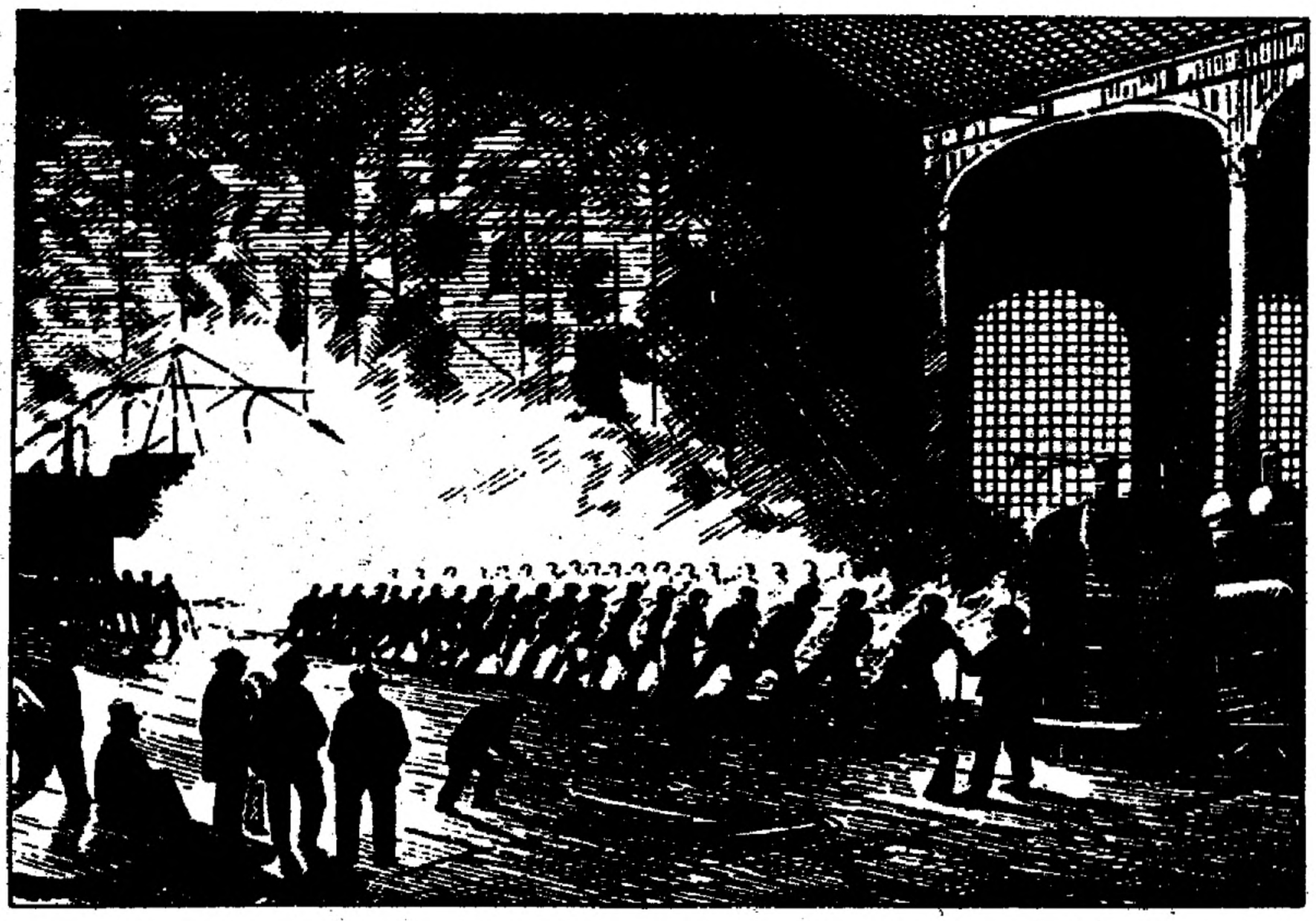


Fig. 252. Laminación de una plancha de blindaje de 20 toneladas, Sheffield, 1881.

La producción de chapa fina fue importante para las industrias del cobre y del latón, incluyendo, por ejemplo, el latón y el metal de Muntz utilizados en innumerables bazares indios. El laminado de chapas finas, primero de hierro y luego de acero, para la fabricación de hojalata fue, sin embargo, particularmente importante: para muchos fines no podía usarse la chapa sin revestir porque se oxidaba. Había una demanda siempre creciente de envases baratos, en especial para conservas de alimentos, y hasta que los americanos introdujeron el arancel de McKinley en 1890, la hojalata fue virtualmente un monopolio británico. La fabricación estaba localizada en el sur de Gales y en Monmouthshire, y los americanos desarrollaron su industria con la ayuda de técnicos galeses. El método de formar chapas por laminación, que se utilizó sin variación alguna desde 1825 aproximadamente, consistía en trabajar dos barras a la vez, calentadas a 790° C. Se laminaban primero por separado, luego juntas y luego se doblaban dos veces, llegándose a un laminado final de las ocho chapas, que tenía por objeto asegurar un grosor que, tras haber añadido el estaño, no excediera mucho de 0,25 milímetros. La chapa caliente laminada era recocida, desoxidada y sumergida en aceite antes de serlo en el baño de estaño. Se sumergía dos veces en este baño, se engrasaba y luego se hacía pasar por los laminadores para regular el grosor del estaño, que aun en la hojalata de mejor calidad formaba una chapa de menos de 0,125 milímetros de espesor.

Como la hojalata se oxidaba rápidamente al aire libre, un importante perfeccionamiento —que empezó a explotarse comercialmente en Wolverhampton en 1838— fue la fabricación de chapa ondulada «galvanizada», que tuvo una gran demanda en los placeres auríferos a mediados de siglo, y desde entonces ha techado los edificios más humildes de media humanidad. La ondulación, usada en el mundo antiguo para dar más resistencia al bronce, fue adoptada en primer lugar para techos de hierro por R. Walter,

natural de Rotherhithe, en 1828, con objeto de aumentar la carga admisible para un espesor dado; ocho años después el químico francés M. Sorel introdujo la galvanización de la chapa, proceso de inmersión en cinc fundido, sin relación con los trabajos de Galvani (p. 895).

Las vallas de alambre y el alambre de espinos galvanizados, invento americano este último, desempeñaron un papel importante desde la década de 1880 en la exploración y parcelación de grandes comarcas, particularmente para ranchos de ganado. El alambre había tenido una gran demanda por primera vez una generación antes con la llegada del cable metálico trenzado, que W. A. J. Albert adoptó en las minas de Clausthal en 1834, y del telégrafo. Warrington se convirtió en el centro de una nueva industria usando el «tren belga» de cilindros acanalados, que fabricaba el alambre forzando el paso del metal a través de agujeros de tamaño decreciente y diferente perfil (cuadrado, romboidal, oval y circular sucesivamente). En 1862 el tren belga había sido transformado por G. Bedson en un tren laminador continuo de dieciséis cajas, dispuestas alternativamente en posición horizontal y vertical de modo que la varilla no necesitara rotar, que giraban a velocidades crecientes para que la varilla no dejara de pasar al disminuir su grosor. Desde 1882 se adoptaron nuevas mejoras en el tipo de laminador construido en América según los diseños de W. Garrett, permitiendo convertir en nueve horas 50 toneladas de varilla de acero en un solo rollo de alambre de seis milímetros de diámetro. El alambre de cobre, adoptado en telegrafía desde la década de 1860 y usado en cantidades cada vez mayores para la conducción eléctrica, se fabricaba según el método del laminado del acero. Entre las industrias auxiliares que utilizaban alambre, con maquinaria cada vez más compleja y producción creciente, se contaban las ya tradicionales de clavos, alfileres y agujas, la fabricación de paraguas y la fabricación de tela metálica que completaba el uso de

la valla de alambre galvanizado. Ejemplo destacado de un nuevo procedimiento fue el temple isotérmico, introducido por J. Horsefall en 1854 para producir alambre de acero de gran resistencia a la tracción por un proceso continuo, pasando sucesivamente el torón por un horno de calentamiento, un baño de temple y un baño de revenido de plomo fundido. Las aplicaciones de sus productos abarcaban desde el arado a vapor a la fabricación de pianos, y se les hizo buena publicidad con su utilización en el puente colgante de Brooklin, en Nueva York (p. 663), cuyos cables estaban compuestos cada uno de 6.400 alambres de acero de gran resistencia a la tracción de «100 toneladas».

Los tubos sin soldadura fueron un producto de gran importancia para la ingeniería del siglo XIX. En el caso del plomo el problema se había resuelto ya en 1790, cuando John Wilkinson obtuvo una patente para fundir un tubo de plomo alrededor de una barra de acero en un molde; en 1838 este método fue desarrolladó por Ch. Green para tubos de latón y cobre. Utilizaba un molde cilíndrico hendido para formar el tubo original, que era luego trefilado a través de una sucesión de hileras de diámetro decreciente. Este método llegó a ser de práctica normal en Birmingham, y se usó para hacer tubos para los condensadores de las máquinas de vapor durante más de cincuenta años. El método de extrusión se remonta también a finales del siglo XVIII, habiendo sido sugerido, pero no practicado, por Bramah en 1797. En 1820 un plomero de Shrewsbury, T. Burr, ideó un método sencillo por el cual un pistón hidráulico forzaba al plomo a emerger en forma de tubo presionándolo entre una pieza central circular y una hilera circular envolvente. Este procedimiento fue muy utilizado para la envoltura de cables eléctricos con plomo, pero hasta cerca de finales de siglo no se encontró el medio de aplicar esta técnica al cobre y sus aleaciones, que requerían ser trabajados a alta temperatura. Para la fabricación de tubos de acero sin

soldadura se patentó un proceso satisfactorio un cuarto de siglo después que el fabricante de acero alemán R. Mannesmann concibiera la idea en 1860. Una barra de metal caliente pasaba primero entre dos rodillos laminadores de eje oblicuo que la dirigían contra el extremo cónico de un mandril situado inmediatamente después de los laminadores, mandril que formaba la cavidad interna del tubo. Thomas Edison consideró este invento como el más impresionante de la Exposición Mundial de Chicago de 1893.

Podemos tomar un último ejemplo de la iniciativa británica. En 1840 G. R. y H. Elkington adoptaron el uso de la galvanoplastia para revestir chapas de metales comunes y aleaciones tales como el cobre, el latón o la alpaca con plata y oro, y hallaron que existía un enorme campo para la venta a las nacientes clases medias de un tipo de artículos de lujo que podían parecer más valiosos de lo que en realidad eran. Anfitrionas cargadas de joyas con un baño de oro presidían suspirando mesas de té y de café con cacharros, jarras y cucharas plateadas, y durante un cuarto de siglo Gran Bretaña gozó de un virtual monopolio en este tipo de manufactura. En 1900, sin embargo, los aranceles crecientes habían cerrado muchos mercados extranjeros y la manufactura de este tipo de producción llegó a tener su centro en Alemania.

ARMAMENTO

Aunque el desarrollo del armamento moderno dependía de la industria de explosivos (p. 797) para obtener proyectiles más potentes, su base la constituían aún las industrias del metal. Hasta 1815, en realidad, la principal evolución en el arte de la guerra fue el gran aumento de la utilización del cañón en el campo de batalla: bajo Federico el Grande y Napoleón los cañones cesaron de estar dispersos entre los regimientos de infantería y llegaron a ser dos veces

más numerosos, en proporción a las tropas combatientes, de lo que habían sido en los ejércitos más pequeños de los tiempos de Marlborough. Desde Friedland (1807), las grandes concentraciones de artillería desempeñaron un papel tan importante en las victorias de Napoleón como su talento para movilizar rápidamente grandes ejércitos.

Al crecer su número se redujo la longitud y el peso medio de las piezas de campaña fundidas en hierro o bronce, así como la variedad de calibre, mientras que se consiguió mayor exactitud de puntería gracias al uso del péndulo balístico para medir la velocidad del proyectil: este péndulo había sido descrito ante la Royal Society por su inventor, Benjamin Robins, en 1742. Los propios proyectiles se modernizaron hasta cierto punto. Para la defensa de Gibraltar en 1779-83 los ingleses emplearon una granada que, a diferencia de las granadas de mortero más antiguas, tenía espoleta de corto retardo para ser disparada por un cañón, y poco después Henry Shrapnel, un oficial inglés de artillería, empezó a desarrollar su «caja esférica», usada con éxito en la toma de Surinam en 1804; éste llegó a ser el más eficaz de los proyectiles contra tropas. El principal factor, sin embargo, fue el aumento de movilidad de los cañones. La «artillería a caballo», concebida para operar con la caballería —como la otra artillería de campaña con la infantería— fue introducida por Federico en 1759, y se extendió a los ejércitos inglés y francés en la década de 1790, mientras que el ejército francés en los últimos años del Antiguo Régimen había empezado a usar atalajes por pares y cureñas normales de seis ruedas, junto con ruedas y otras piezas intercambiables.

El mosquete de llave de chispa y la bayoneta eran aún las armas normales de la infantería, fabricado aquél comúnmente por armeros locales con la ayuda de molinos de agua para el bruñido y el pulido. Sólo en Pensilvania se fabricaron 100.000 fusiles en los incidentes de 1774. La producción en masa por Eli

Whitney de piezas intercambiables ya se ha mencionado en otra parte (p. 519). El fusil, que había hecho una aparición esporádica en tiempos anteriores (página 217), fue usado con eficacia por los *minutemen* americanos en la Guerra de Independencia, y en 1800 se dotó a la recién creada Brigada Británica de Fusileros con el fusil conocido como rifle de Baker, con siete estrías que daban sólo un cuarto de vuelta en un cañón de 76 centímetros de longitud. Sus defectos, sin embargo, consistían en una marcada tendencia a que el cañón se atascara y en la dificultad de cargar la bala lo bastante herméticamente a causa del rayado. En América estos defectos fueron salvados en su mayor parte improvisando un taco, que se apretaba alrededor de la bala y caía fuera al descargarse; pero el rifle de Baker demostró ser muy impreciso, y Napoleón lo retiró del servicio en Francia.

En las armas ligeras no se produjeron cambios básicos hasta que el sistema de disparo sufrió una revolución. En 1809 Alexander Forsyth, un pastor presbiteriano escocés con aficiones deportivas, patentó una pólvora de percusión que condujo a su vez al invento de una cápsula fulminante de acero, o bien de cobre. A los diez años del invento de Forsyth, la llave de chispa, que era muy sensible a la humedad, pudo ser sustituida por un mecanismo percusor resistente a la intemperie, descansando la cápsula sobre la corona de una chimenea que contenía el canal de fuego. El Ministerio de la Guerra británico, sin embargo, fue tan lento en adoptar esta mejora que la primera orden de entrega de una adjudicación le llegó a Forsyth en el día de su muerte en 1843. Mientras tanto, la propia bala había sido rediseñada por el capitán J. Norton, como resultado de su observación del uso hecho en el sur de la India de la médula de loto, con la que los nativos aseguraban un ajuste hermético para las flechas disparadas por cerbatanas. En consecuencia, diseñó una bala cilíndrica ahusada de base hueca, que se dilataba al

disparar y obturaba de forma efectiva el ánima. En manos francesas la idea fue finalmente plasmada en la bala Minié (1849), y aproximadamente al mismo tiempo un armero de París, Houiller, presentó la primera vaina de cartucho expansiva de cobre, que impedía el escape de gases por la recámara. Así quedaba despejado por fin el camino para la adopción del rayado y la retrocarga.

Las tropas británicas usaron un rifle del modelo Minié en la guerra de Kaffir en 1852, el año de su adopción por el ejército francés, pero fue sustituido por el Lee-Enfield, fabricado según principios americanos (p. 519); la retrocarga no fue aceptada en Gran Bretaña hasta después de la guerra austro-prusiana de 1866, cuando se incorporó a los nuevos rifles Martini-Henry. Los prusianos habían empezado a usar un rifle de retrocarga, el fusil de aguja, inventado por J. N. Dreyse, en 1841, y fueron completamente reequipados en 1858. Su rapidez de tiro aumentada y la mayor facilidad de poder cargarlo en posición prona fueron factores importantes en su victoria sobre los austriacos, que en 1866 estaban usando todavía armas de avancarga. Pero la aguja, que dio su nombre al arma, estaba expuesta a atascarse y a oxidarse, en tanto que el rifle de Chassepot, que sustituyó al Minié en Francia en 1866, tenía un alcance varios cientos de metros mayor que el fusil de aguja. Por ello la victoria prusiana sobre Francia en 1870-71 debe atribuirse a factores distintos del fusil de aguja, si bien la disciplinada descarga cerrada de la infantería prusiana causó grandes estragos, en especial al detener las cargas de caballería.

Con el rifle Martini-Henry el ejército británico usó el primer cartucho metálico, que tenía un culote de hierro y paredes de fino alambre de latón enrollado. Cuando se usó en el Sudán en 1882 presentó el inconveniente de encasquillarse con frecuencia, por lo que fue sustituido por una vaina fabricada por George Kynoch, natural de Birmingham, que se usaba ya mucho en otros países. Esta vaina estaba construida

de latón, estirado por una serie de operaciones que incluía trabajo en frío suficiente para que resistiera la fuerza explosiva del propulsor. Un oficial del ejército suizo, Eduard Rubin, introdujo otras mejoras, especialmente la sustitución por una camisa de cobre que encerraba un núcleo de plomo de las antiguas balas de plomo blando, que a gran velocidad dejaban de seguir el rayado. Después de mucha rivalidad entre los químicos, P. M. E. Vieille inventó en Francia una satisfactoria pólvora sin humo, la *Poudre B* (página 800); esta pólvora cambió la táctica e incluso la apariencia del campo de batalla, e hizo del rifle Lebel francés de 1886 durante algún tiempo el arma principal de la infantería. El rifle de repetición, así como el revólver Colt (p. 519), se conocieron primero en América, pero el primer tipo que tuvo un uso general fue uno tubular de ocho cartuchos empleado por el ejército alemán en 1884.

La ametralladora tiene en común con el torpedo y la mina disparada eléctricamente el ser un invento que se realizó durante la Guerra de Secesión americana, pero cuyas plenas consecuencias no llegaron a ser patentes hasta las guerras del siglo xx. Empezó siendo un rifle giratorio de diez cañones, alimentado por gravedad y girado por una manivela, inventado por R. J. Gatling, y utilizado todavía por los *rough-riders* de Theodore Roosevelt en Cuba en 1898. La *mitrailleuse,* que tenía veinticinco cañones dentro de un tubo cilíndrico de metal y disparaba 125 tiros por minuto, le siguió en el tiempo para figurar como el «arma secreta» francesa en la guerra de 1870. Pero fue la ametralladora de retroceso de Hiram S. Maxim de 1884 la que, pese a su fácil recalentamiento y excesivo peso, se convirtió en el arma clave de la guerra de trincheras.

Al acabar el siglo xix los progresos de la artillería constituían aún el campo principal de la creciente rivalidad internacional en materia de armamento. Esto sucedía en cierto modo porque el cañón de grueso calibre era un elemento común de la guerra

terrestre y marítima. Del perfeccionamiento de la granada por H. J. Paixhans, adoptado por los franceses en 1827, data la necesidad de que los barcos de guerra se construyeran de hierro y blindados, aunque la lección no fue aprendida hasta que una escuadra entera de fragatas turcas de madera fue arrasada por el cañoneo ruso en Sinop en 1853. En 1861 el primer buque de guerra totalmente de hierro, el *Warrior* (p. 543), tenía planchas de 11,5 centímetros de grueso; a los veinte años el espesor requerido había crecido a 61 centímetros. En tierra existía una necesidad similar de fortalezas diseñadas para resistir el cañoneo —aunque dos grandes defensas, la de Sebastopol por los rusos y la de Plevna por los turcos, probaron el alto valor de los movimientos de tierra improvisados dirigidos por jefes resueltos—, y en particular el desarrollo en la producción de explosivos de alta potencia durante la década de 1880 condujo al uso en gran escala de hormigón armado y cúpulas blindadas.

Los fuertes aislados y la *enceinte* de Amberes, diseñados en 1859 para contener una guarnición de 100.000 hombres, son un recordatorio de que las pequeñas potencias podían invertir sumas considerables en defensas fijas. Pero la posesión de las armas de ataque más eficaces implicaba, cada vez más, recursos técnicos y financieros que sólo estaban a disposición de las grandes potencias. Así, los ejércitos alemán y austro-húngaro se distinguieron por su posesión de trenes de asedio de grandes obuses, que disparaban con una trayectoria de fuerte pendiente. La Armada británica, asimismo, mantuvo su ascendiente gracias a dos costosos períodos de experimentación. El primero fue en los años 1870-80, cuando se comenzaron a montar cañones de grueso calibre en una torreta, tal como la diseñó originalmente Ericsson para albergar los cañones de 28 centímetros del *Monitor* (fig. 253), que contribuyó a mantener el bloqueo federal de los estados del Sur en 1862. El segundo fue en la década siguiente, cuando se necesitaron compartimentos-estancos, blindaje más grueso

(p. 724), redes antitorpedos y un fuerte armamento secundario como protección contra los torpederos.

Alrededor de 1850 volvieron a ser fabricados durante algún tiempo cañones de hierro forjado, como en los primeros tiempos, y en 1855 W. G. Armstrong produjo sus primeras piezas en Elswick por el método de enmanguitar en caliente sucesivas capas de metal, de modo que las capas exteriores participaran de los esfuerzos ocasionados por el disparo. Tanto el rayado como la retrocarga de la artillería habían sido utilizados separadamente en el pasado; se combinaron con éxito en el experimento sardo de 1845 y en el prusiano de 1846. En el sitio de Sebastopol, sin

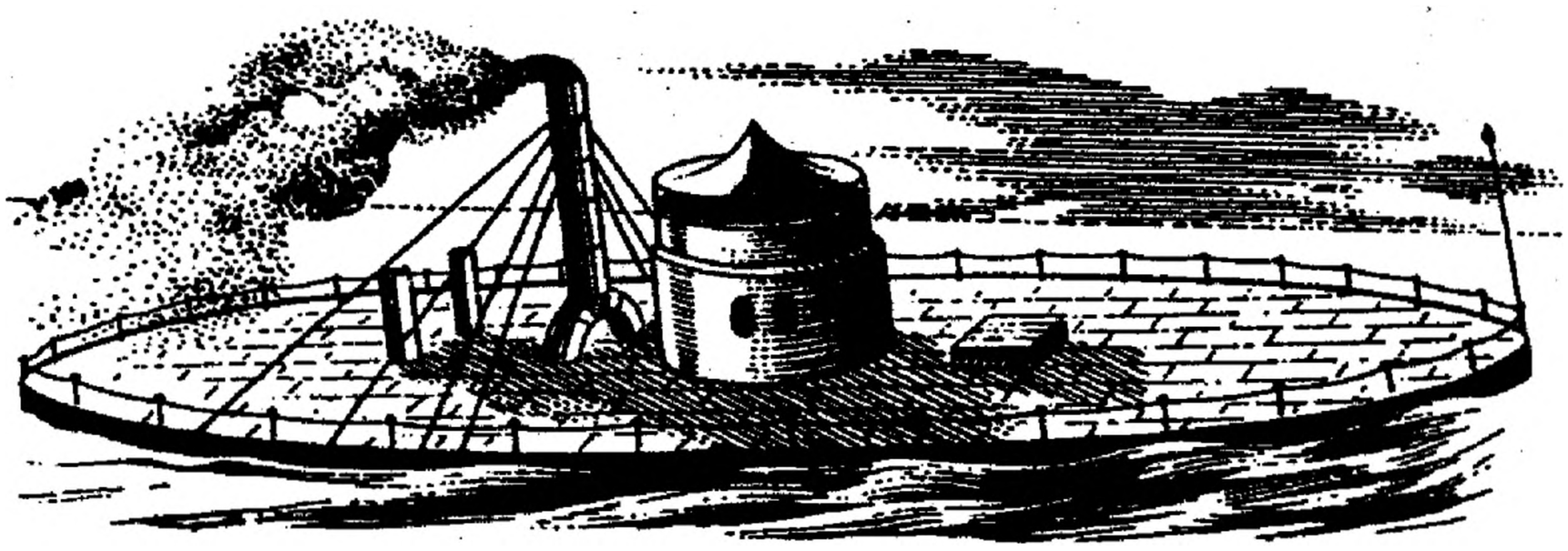


Fig. 253. El acorazado americano *Monitor*.

embargo, la artillería británica tuvo que improvisar una tosca forma de rayado; y aunque ambas mejoras fueron luego adoptadas oficialmente, un contratiempo con los primeros cañones de retrocarga condujo a una vuelta a la avancarga para todos los cañones británicos durante el período 1865-1881. Esto es de destacar, puesto que la guerra de 1870 demostró por encima de todo la superioridad de la artillería prusiana de retrocarga, hecha de acero colado por Krupp (fig. 254), sobre las armas de avancarga de bronce de los franceses. Más de veinte fortalezas francesas fueron capturadas en seis meses, y el cerco y la destrucción del principal ejército de campaña francés en Sedán fue descrito por un contemporáneo como «la batalla ideal del cañón».

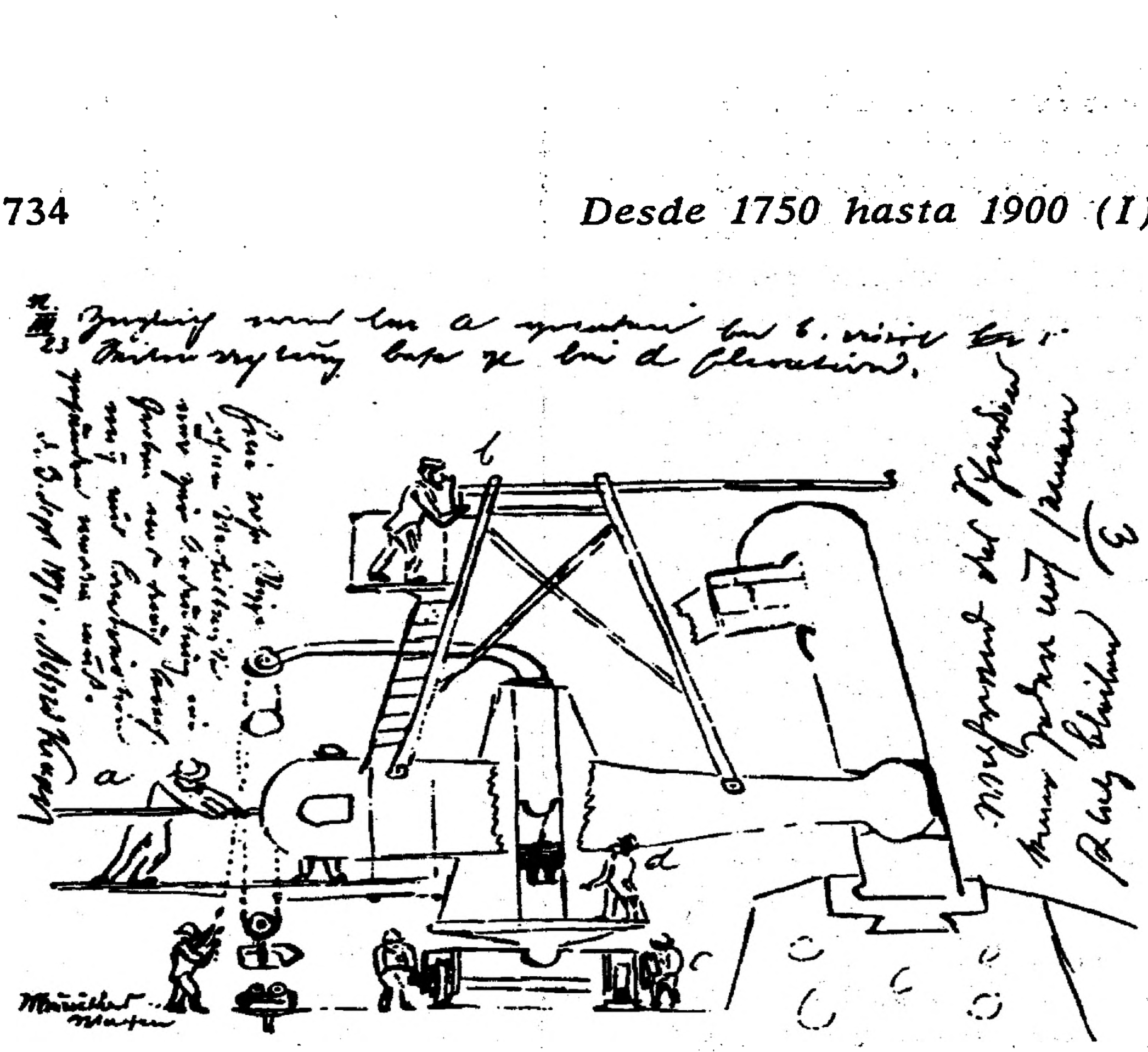


Fig. 254. Bosquejo de Alfred Krupp para el montaje de un cañón pesado, 1875.

El perfeccionamiento de los impelentes exigía mejoras constantes de los nuevos aceros de aleación (p. 708), con los que cada vez más se fabricaban tanto los cañones como las planchas de blindaje. Pero a final de siglo el principal problema del artillero era idear un verdadero cañón de tiro rápido que pudiera competir con la rapidez del nuevo rifle de repetición. La artillería que Whitworth suministró al gobierno federal en la Guerra de Secesión americana se clasificó como de tiro rápido: pero el principal problema de cómo amortiguar el retroceso al disparar, de modo que el cañón no necesitara volver a ser colocado, aún esperaba solución. (Sir) William Siemens propuso en 1867 la utilización de la resistencia del agua al fluir por un orificio. El primer cañón de tiro rápido de éxito total, sin embargo, fue el famoso «75» francés, que incluía también complicados dispositivos para mantener la cureña perfectamente fija

durante el tiro. Este cañón fue puesto en uso en 1898, para disparar tanto metralla como explosivo rompedor; en 1902 se le añadió un escudo protector.

Quedan por mencionar dos nuevos usos del metal en la guerra. La historia moderna del lanzamiento de minas navales empieza con los primeros recipientes de metal llenos de explosivos que colocaron los rusos frente a Kronstadt en la Guerra de Crimea. El torpedo autopropulsado —distinto de las cargas explosivas metidas en lanchas de la Guerra de Secesión americana— fue invención de un escocés, Robert Whitehead, que trabajaba en Austria en 1864. Ya en 1890 su cuerpo de acero podía contener el aire comprimido necesario para propulsar una carga de 90 kilogramos a 29 nudos durante casi 800 metros. Pero quizá se ha dicho ya bastante para probar qué grado de verdad yace tras la generalización de Lewis Mumford: «El derramamiento de sangre corre paralelo con la producción de hierro».

17. NUEVOS MATERIALES: GAS DE HULLA, PETROLEO Y CAUCHO

Estos tres diferentes productos, todos los cuales pasaron a ser de uso general por primera vez durante el siglo XIX aunque eran conocidos mucho antes, tienen al menos una propiedad en común: todos tienen hidrocarburos como principales componentes. El gas de hulla es rico en un hidrocarburo gaseoso, el metano; el petróleo es una compleja mezcla de hidrocarburos líquidos, y el caucho es un sólido derivado principalmente de otro hidrocarburo, el isopreno. En 1900, cuando aún la industria del automóvil no había salido de su infancia, el papel desempeñado por el petróleo y el caucho era todavía insignificante comparado con el que desempeñan hoy. El gas de hulla, por el contrario, alcanzaría en el curso del siglo un completo desarrollo tecnológico como fuente de luz y de calor y como fuente de energía para una máquina motriz, el motor de gas (p. 882); hacia 1900, efectivamente, el alumbrado por gas estaba perdiendo la batalla frente al alumbrado por electricidad. Para otros usos siguió empleándose el gas como antes, pero visto retrospectivamente este producto aparece como una característica especial de las casas y lugares de trabajo del siglo XIX, así como de las áreas urbanas entonces en perpetuo ensanche: por eso le dedicaremos un lugar de honor en este capítulo.

ORIGENES DEL ALUMBRADO POR GAS

Tras haberse dedicado el químico flamenco J. B. van Helmont, a finales del siglo XVI, a investigar la naturaleza del gas y haber inventado el nombre de éste (la forma de pronunciar en flamenco la palabra *caos*), hubo algunas investigaciones inconexas sobre el aire

inflamable en las zonas carboníferas, que claramente tenía alguna relación con la llama producida en la ignición del carbón. Es significativo que en Inglaterra se llevaran a cabo investigaciones sobre este mismo tema en Wigan, Whitehaven y Newcastle upon Tyne. De Wigan procedió el primer informe presentado a la Royal Society en 1667; de Whitehaven, dos generaciones más tarde, la conducción en cañerías del grisú, un proyecto para iluminar la ciudad con él, y —según se dice— la iluminación de hecho de una oficina con este sistema por un agente de las minas de carbón, Carlisle Spedding: pero fue en Newcastle, hacia 1760, donde se hizo el primer intento del que se tienen pruebas testimoniales auténticas de iluminar una habitación por medio del gas de hulla. Se utilizaba una caldera como retorta y se hacía pasar el gas a través de una serie de pipas de arcilla hasta llegar a unos quemadores improvisados a base de unos agujeros hechos en la arcilla. Pero ninguna consecuencia práctica se seguiría de ello ni de la invención del horno para fabricar alquitrán, que, a diferencia del primitivo horno para obtener coque, podía producir tanto gas como alquitrán. Un profesor belga, J. P. Minkelers, escribió en 1784 acerca de la posibilidad de utilizar gas de hulla para inflar globos, y después de su muerte se afirmaría que había iluminado con gas el aula donde daba clases. Pero esto, si efectivamente es verdad, no puede considerarse más que como uno más de la media docena de experimentos similares, entre los que se incluye la iluminación del castillo del Elector de Dresde, que tuvieron lugar en diferentes países a lo largo de las décadas de 1780 y 1790 sin que tuvieran una aplicación comercial. Por ello debemos dedicar nuestra atención a las actividades de Lebon y Murdock.

Philippe Lebon era un ingeniero del Service des Ponts et Chaussées francés, quien desde su infancia estaba familiarizado con la combustión del carbón vegetal. En 1791 comenzó a hacer estudios sobre el gas producido al calentar la madera, y concluyó que

podía ser preparado a plena satisfacción en una retorta de hierro, enfriado, y utilizado posteriormente para el alumbrado, la calefacción, o para inflar globos. Obtuvo una patente en septiembre de 1799, apenas un par de meses antes de que Napoleón se hiciese con el poder del Directorio; habiendo fracasado su intento de atraer la atención del gobierno, comenzó dos años más tarde en su casa de París una serie de exhibiciones nocturnas en las que el gas destilado de la madera era utilizado tanto para calentar e iluminar el interior de la casa como para alimentar una fuente de llamas y producir otros efectos luminosos en el jardín. Lebon no sólo demostró la utilidad práctica de tal gas, sino que su vehemente imaginación se anticipó a casi todas sus posteriores aplicaciones: la suave luz ardiendo en un globo de cristal y la conveniencia de su distribución por el interior de la casa por medio de pequeñas cañerías empotradas en las paredes. Pero no llegó más lejos: aun antes de su prematura muerte en 1804 a manos de unos ladrones en los Campos Elíseos, Francia estaba otra vez en guerra y el nuevo sistema de alumbrado había fracasado en su intento de llamar la imaginación del omnipotente Primer Cónsul. Los experimentos franceses tuvieron la suficiente importancia como para traer a París a uno de los hijos de James Watt a fin de investigar sobre ellos (aun a pesar de estar en guerra el país), e inspiraron a un alemán, F. A. Winzer, la idea de hacer un viaje por diversos países para despertar el interés por el principio del alumbrado de gas; pero para exponer de forma continuada la historia de este nuevo sistema de alumbrado debemos volver a Inglaterra, que poseía copiosas reservas de carbón con las que obtener gas y ricos industriales para respaldar la aventura. Como clase, estos últimos estaban acostumbrados a las innovaciones; el aceite para lámparas y las velas habían subido de precio debido a las dificultades que la guerra imponía a la importación de aceite y sebo ruso; y buscaban un tipo de alumbrado más

seguro, con objeto de reducir las primas a pagar por los seguros contra incendios.

William Murdock era un joven mecánico escocés que fue ascendiendo, hasta convertirse en montador jefe de los talleres de Boulton y Watt en Cornualles. Su interés por encontrar mejores materiales para proteger los fondos de los barcos le llevó a trabajar en la obtención de alquitrán por medio de la destilación de hulla, y en 1792 utilizó el gas generado por la hulla para iluminar las habitaciones de una casa en Redruth, Cornualles. Preocupado por las posibilidades de comercialización, hizo experimentos con carbón de diversa calidad, con varios tipos de quemadores, y con dispositivos destinados a almacenar el gas suficiente para fabricar una lámpara portátil. En 1798 fue trasladado a la fundición de Soho, en Birmingham, donde usó retortas de hierro colado, puestas al rojo, para generar el gas, e iluminó el edificio principal de la fábrica «durante muchas noches sucesivas». El informe de Gregory Watt desde Francia, en que prevenía a la firma del riesgo de que los franceses se adelantasen en la empresa, hizo que Murdock reanudase sus experimentos, con el resultado de que en marzo de 1802 se instalaron en cada uno de los extremos del edificio principal de la fábrica de Soho luminarias de gas para festejar la Paz de Amiens. En 1804 había llevado sus preparativos hasta el punto de que Boulton y Watt estaban dispuestos para admitir pedidos.

Los primeros clientes fueron los propietarios de una gran hilandería de algodón de Salford, que en 1806-1807 instalaron más de 900 lámparas de gas para iluminar la factoría, un tramo de camino particular y una residencia privada. Algunos de los quemadores eran del tipo Argand, una adaptación de la lámpara de aceite suiza del mismo nombre (p. 752), que tenía una mecha cilíndrica, mientras por el centro circulaba aire, y una chimenea de cristal que la protegía, pero la mayoría eran del tipo conocido como Cockspur, que consistía en tres pequeños agujeros al final

de una cañería. Los seis recipientes de hierro colado usados como retortas tenían una profundidad de 1,68 m; cada uno de ellos era alimentado con unos 750 kg de carbón, contenidos en un recipiente de metal con paredes caladas, movido por medio de una grúa (fig. 255). El cierre hidráulico se movía a mano, y el gas era conducido por una tubería hasta su con-

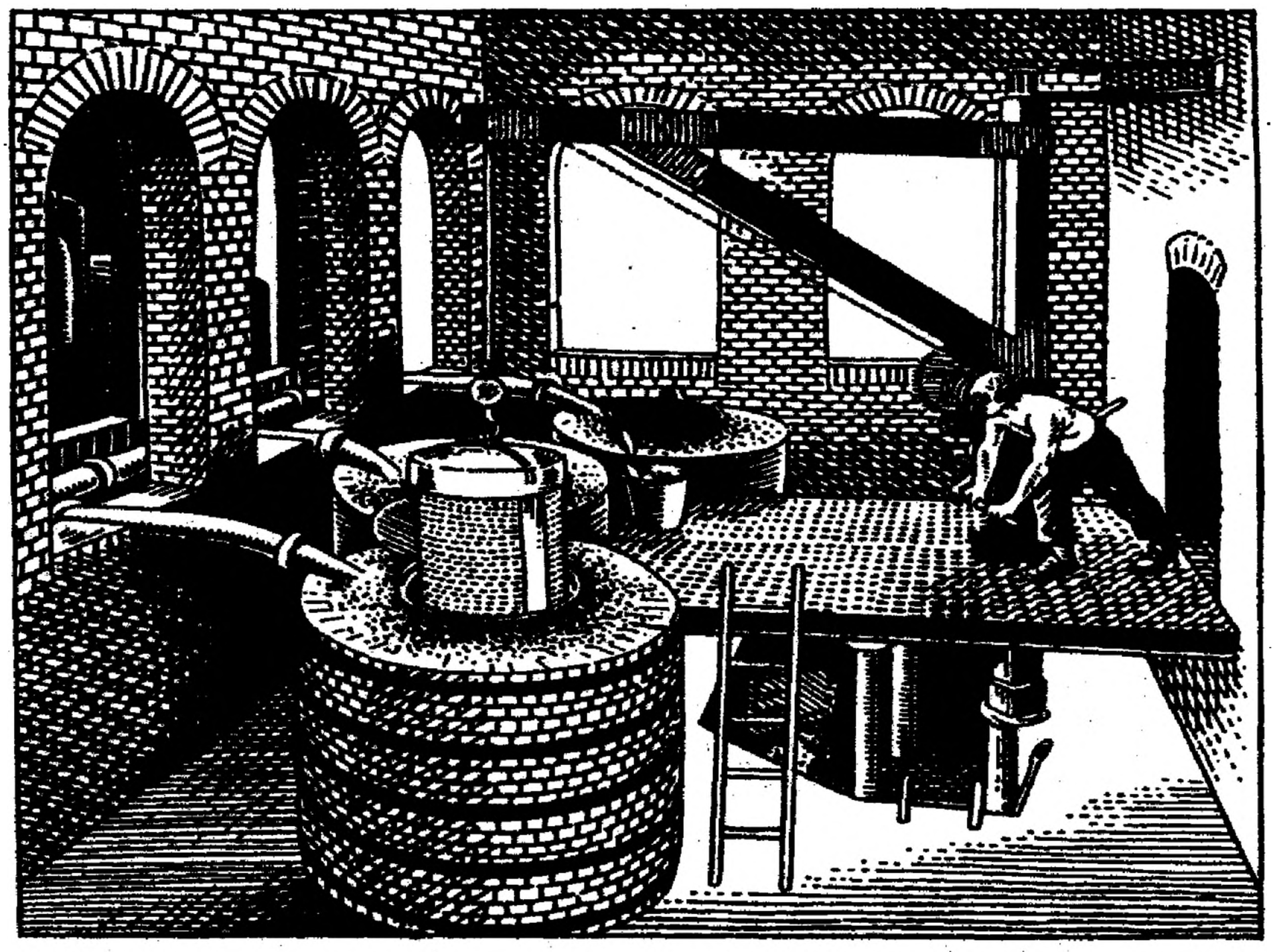


Fig. 255. Equipo de Murdock para la fabricación de gas, realizado para la firma Phillips & Lee, 1806.

densador, enfriado por aire, del que escurría el alquitrán a un foso. Los recipientes en que se almacenaba el gas tenían forma de campana, estaban hechos de chapa de hierro y tenían unas dimensiones de 3 m de diámetro y 3 m de altura; eran mantenidos en suspensión en agua para lograr la necesaria impermeabilidad al gas, y eran sostenidos en el centro por medio de una polea y un contrapeso, de forma que pudiesen moverse hacia arriba y hacia abajo al variar el peso

del gas contenido en ellos. Como el gas, por lo que sabemos, no era ni lavado ni purificado, necesariamente tenía que producir un olor muy desagradable al ser quemado, pero como los costes de alumbrado se reducían en forma muy considerable, incluso un sistema tan primitivo como éste fue considerado un éxito.

Murdock introdujo posteriormente varias mejoras, entre ellas la aplicación indirecta del calor del horno a la retorta y la introducción de un chorro de agua por la parte inferior del condensador, que terminaba escurriendo hasta el foso donde se acumulaba el alquitrán, arrastrando consigo otras impurezas. No se sabe con certeza por qué Boulton y Watt, que habían conseguido un éxito inicial fulgurante en la manufactura de sistemas de gas, para lo que estaban doblemente bien equipados dado el tamaño y envergadura de sus talleres y la presencia de Murdock entre su personal, abandonaron la empresa en el momento en que justamente comenzaba su expansión, en 1814 (fig. 256). En cualquier caso, aunque Murdock participase activamente en los negocios durante otros dieciséis años, el desarrollo de sistemas más eficaces para la obtención y uso del gas pasó por completo a otras manos.

Samuel Clegg pertenecía a la generación posterior a Murdock, y tenía la ventaja de haber hecho durante algún tiempo estudios científicos bajo la di-

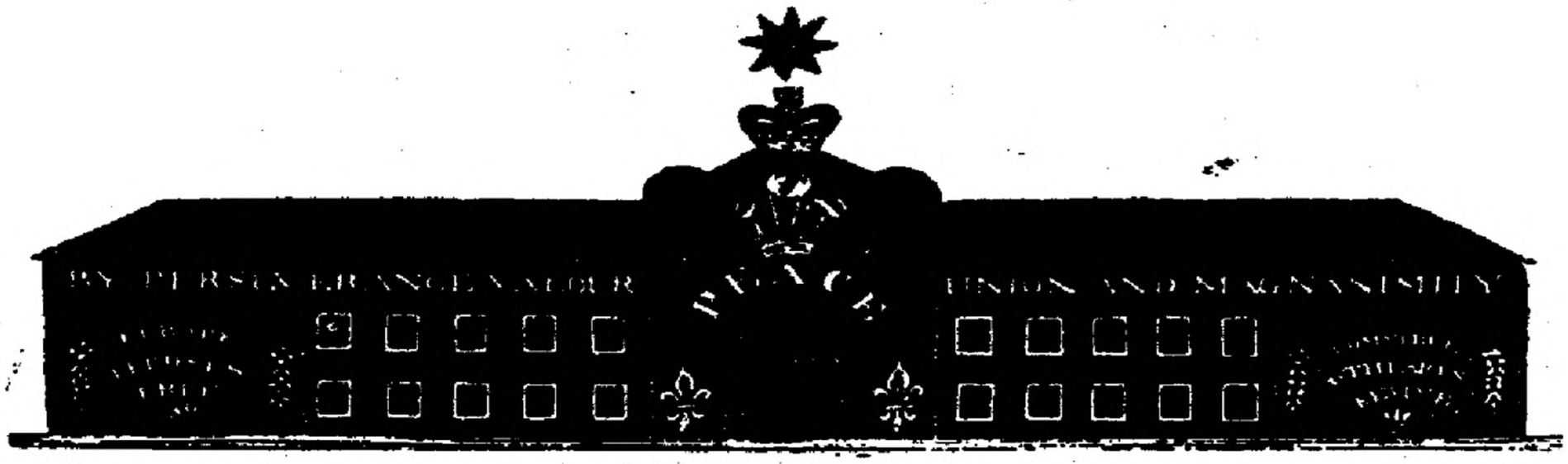


Fig. 256. La fachada, de 55 m., de la fundición de Soho, iluminada por gas con motivo de la Paz de París, junio 1814.

rección de John Dalton, en Manchester, antes de colocarse como aprendiz con Boulton y Watt, con los que empezó a trabajar justo a tiempo de participar en la preparación de las luminarias de gas hechas para conmemorar la Paz de 1802. En 1805, sin embargo, había abandonado la firma y comenzado a hacer instalaciones de gas en fábricas, aproximadamente al mismo tiempo que Murdock. Su primera mejora de importancia fue la purificación del gas gracias a la calcificación del agua por la que pasaba, y en 1810 (en el Stonyhurst College de Lancashire) introdujo una nueva máquina para calcificar el agua. Inventó también un sistema de construcción hidráulica para las hilanderías de algodón de algunos de sus clientes, e hizo una gran propaganda del gas al instalarlo en Londres en la casa y oficinas de Rudolph Ackermann, el famoso inventor; allí dos retortas de hierro colado, cada una con una capacidad de 50 kg de carbón, abastecían a ochenta quemadores, que servían tanto para el alumbrado como para la calefacción. Pero el servicio más importante prestado por Clegg se refiere a la transición de las instalaciones de carácter local a instalaciones de carácter general.

La idea de distribuir el gas a toda una zona de una ciudad desde una estación generadora central se le había ocurrido por primera vez al alemán emigrado F. A. Winsor (antes Winzer), quien desde 1806 trataba de obtener un permiso del Parlamento en exclusiva y accionistas para una sociedad anónima que suministrase luz a Londres. En 1807 se le permitió hacer propaganda de su proyecto iluminando parte del Pall Mall; y, a pesar de las condiciones impuestas por la guerra y la encarnizada oposición de Boulton y Watt y otras partes interesadas, en 1812 había obtenido una exclusiva para crear The Gas Light & Coke Company. Pero ni Winsor ni el químico F. C. Accum, que se había sumado a la empresa con sus conocimientos, tenían la necesaria experiencia administrativa ni de ingeniería, y la compañía sólo logró salvarse

en sus primeros meses de vida tras haber contratado a Samuel Clegg. Como resultado de sus esfuerzos, el 1 de abril de 1814 la parroquia de St. Margaret, en Westminster, fue alumbrada por gas; en diciembre de 1816 Londres tenía 42 km de conducciones de gas. La práctica cada vez más generalizada de reducir las primas de los seguros contra incendios de los edificios públicos y fábricas iluminadas con gas aseguró la difusión del sistema.

Como se muestra en el libro de Accum *Practical treatise on gas-light* (1815), se empezó usando retortas de hierro colado y sección circular, pero quemaban mal el carbón, y pronto serían reemplazadas por retortas elípticas. El gas se enfriaba haciéndolo pasar a través de un serpentín sumergido en el agua contenida en el recipiente de almacenamiento, y luego era purificado con cal y lavado. Sin embargo, la máquina de calcificar el agua era imperfecta, y la compañía se encontraba con un líquido apestoso, el «*blue billy*», que había que concentrar y luego acarrear de noche por las calles de la ciudad. La distribución callejera del gas no se había mostrado demasiado complicada, ya que acababan de hacer su aparición las cañerías de hierro para la conducción de agua. La cañería de servicio que iba hasta el interior de las casas era conocida (y todavía sigue siéndolo) en Inglaterra con el nombre de «*barrel*» (cañón), porque se hacía, como los tubos de los cañones de peor calidad, con tiras de hierro de 1 m de longitud, arrolladas en torno a un mandril y soldadas todo a lo largo de las junturas; y lo que es más, incluso se usaron en su construcción algunos de los cañones de desecho de las guerras con Francia.

LA ERA DEL GAS

En 1817, cuando Clegg abandonó The Gas Light & Coke Company a causa de diferencias financieras, el uso del gas estaba dejando rápidamente de ser una

simple novedad experimental. Ese mismo año sería patentado un proceso de calcificación en seco, y en 1819 el yerno de Clegg, John Malam, perfeccionó un contador para medir la producción. En 1823 había tres compañías de gas rivales funcionando en Londres, al norte del Támesis, y los industriales con intereses en la explotación del aceite de ballena intentaban en vano hacerles la competencia desintegrando grasas animales en retortas de hierro colado, a fin de obtener gas para alumbrar grandes edificios, tales como iglesias, teatros, clubs y tiendas. Ya se había comprobado que el alumbrado por gas tenía múltiples ventajas, que compensaban los gastos de instalación: además de su mayor comodidad, el abastecimiento costaba sólo un tercio, e incluso a veces sólo un cuarto de lo que costaba obtener la misma cantidad de luz con aceite. Por lo que respecta a los avances técnicos, debe señalarse que el inmediato sucesor de Clegg en The Gas Light & Coke Company, T. S. Peckston, que escribió el primer tratado moderno sobre el gas, tenía una preparación que le permitió establecer principios que prevalecieron hasta casi el final del siglo XIX.

Las retortas iban montadas en baterías de tres, cuatro o cinco, y posteriormente en dos baterías, puestas la una contra la otra. Hacia 1850 habían empezado a fabricarse de arcilla refractaria, con sólo las bocas de hierro, y alcanzaban hasta 5,5 m de longitud, pudiendo abrirse por cualquiera de los dos extremos; pero su carga y descarga era todavía, en fecha tan tardía como la década de 1870, una ardua tarea manual, incluso en las grandes fábricas de gas de Londres (fig. 257). Hasta finales de siglo no sería reemplazada la cal por óxido de hierro en el proceso de purificación. Al final de la década de 1830 se introdujeron bombas de extracción para sacar el gas de las retortas y hacer más eficaz el lavado y fregado: ello reducía las molestias ocasionadas por el amoníaco, que corroía las junturas y envenenaba el aire. No hubo contadores para los consumidores has-

ta la segunda mitad del siglo, de modo que el gas se cobraba a menudo por el número de quemadores en uso. Los dos tipos normales de quemadores eran la larga y estrecha hendidura conocida como quemador de mariposa y el quemador en cola de pez, en el que convergían dos chorros de gas; este quemador fue inventado por J. B. Neilson, que era capataz en

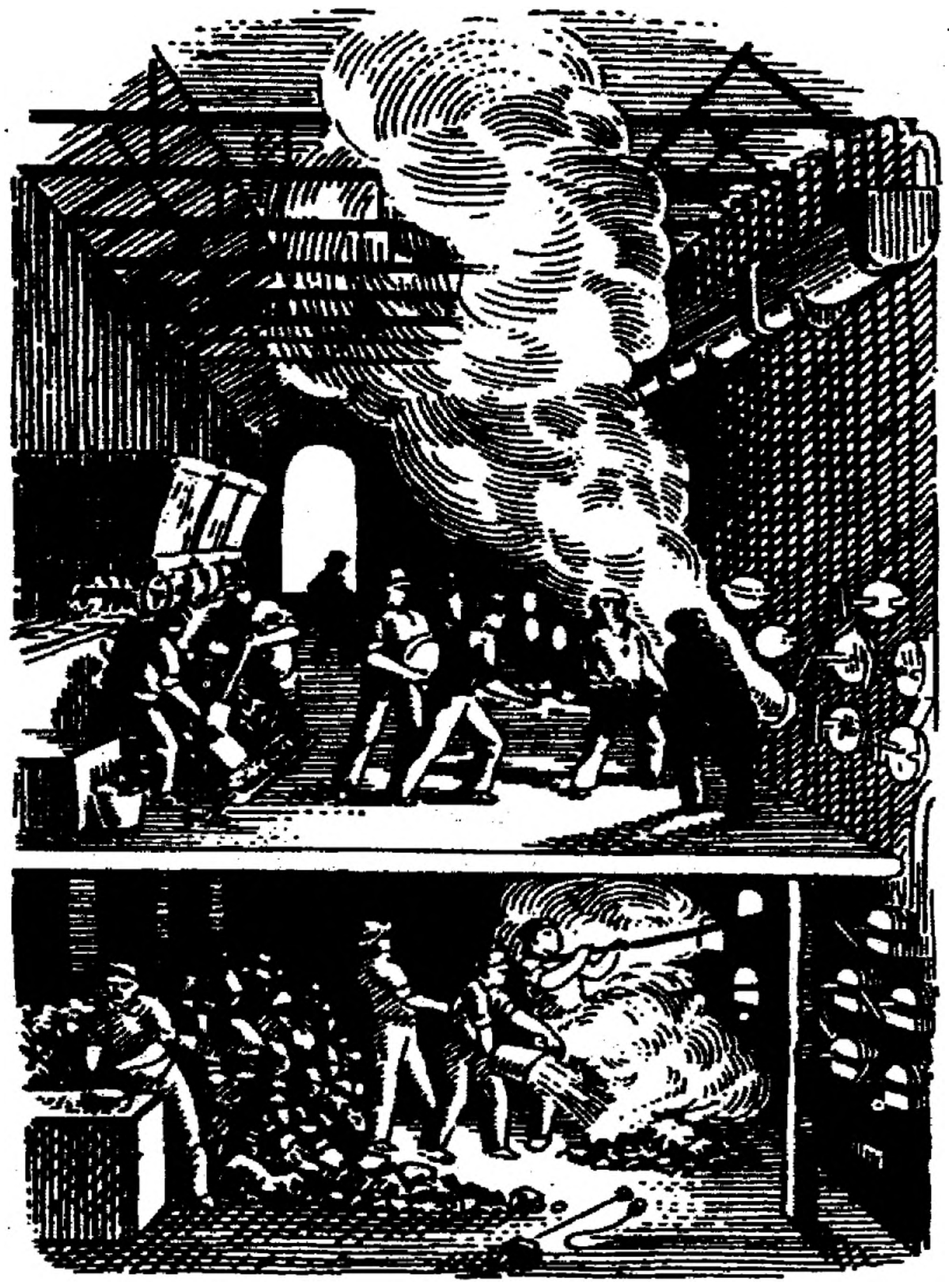


Fig. 257. Cámara de retortas de la fábrica de gas Great Central.

la fábrica de gas de Glasgow, cerca de diez años antes de que patentase la tobera para introducir una corriente de aire caliente (p. 697). El quemador Argand, por otra parte, incluso en una versión mejorada adoptada por el gobierno inglés en 1869, era rechazada por el público consumidor, por ser antieconómico, frágil y despedir mucho humo. Pero la opinión del consumidor se refleja mejor indicando que era de uso común colocar encima de los quema-

dores unos tubos especiales de ventilación, llamados «*perdifumes*»; la verdad era que ni la calidad del propio gas, ni la precisión con que se hacían las junturas, ni la habilidad técnica con que se hacían las instalaciones, eran adecuadas para proteger al consumidor contra serias incomodidades cuando se trataba de habitaciones pequeñas. Así en 1833 la revista *Mechanic's Magazine* sugería que el mejor sistema para iluminar una habitación con gas era colocar el quemador en el exterior de la ventana, y diez años más tarde Michael Faraday era consultado por los eruditos del Athenaeum sobre cuál podría ser el sistema para mitigar lo que ellos llamaban efectos estupefacientes del gas en las habitaciones relativamente espaciosas de su sede de Pall Mall. De ahí la importancia que se concedió a la introducción del quemador atmosférico, que introducía aire en el flujo de gas justo por debajo del punto de ignición, lográndose así una combustión mucho más completa: este quemador fue diseñado alrededor de 1840, pero la famosa versión de Bunsen —más apropiada para dar calor que luz— tendría que esperar a que, en 1855, estuviese terminado el nuevo laboratorio que para él se estaba montando en Heidelberg. Otros treinta años habrían le pasar antes de que la llama amarilla de gas que calentaba la atmósfera, ennegrecía los techos y proporcionaba sólo una moderada iluminación con un gran gasto de gas cediese el paso al manguito incandescente, mucho más eficaz, impregnado de óxido de torio y un poco de óxido de cerio, inventado por el austríaco C. A. von Welsbach para una industria ante la cual la electricidad estaba mostrándose ya entonces como un serio rival.

El manguito incandescente retardó el fin del alumbrado de gas hasta más allá de terminado el siglo, cuya historia social había contribuido a modelar. En los primeros años del siglo Andrew Ure había sostenido que la luz de gas podría reemplazar perfectamente a la luz del sol, de forma que no era una aberración moral obligar a los niños a que trabajasen

doce horas diarias en las fábricas. Un instinto humanitario mejor orientado era el que hacía hincapié en la influencia civilizadora de las calles iluminadas con gas, en especial cuando ello se hizo habitual en los barrios más pobres de las grandes ciudades. La luz de gas aumentó los atractivos de todos los lugares de entretenimiento o instrucción, al tiempo que animaba la honesta vida familiar de los hogares victorianos. Y sobre todo, desempeñó un enorme aunque incalculable papel en el desarrollo de la costumbre de leer en el seno de una población en la que el analfabetismo disminuía cada vez más tras la promulgación en 1870 de la Ley de Educación Elemental.

Todo ello, por supuesto, no se refiere en exclusiva a Inglaterra, pero la baratura del carbón y la rapidez de la urbanización combinadas hicieron que el alumbrado por gas se extendiese más rápidamente por la isla que en ninguna otra parte; ya en 1823 cincuenta y dos ciudades inglesas estaban iluminadas por gas, y en 1859 había cerca de un millar de fábricas de gas. Es algo irónico el hecho de que Boulton y Watt se sintiesen impulsados a apresurar sus primeros experimentos por el informe de Gregory Watt en que afirmaba que los franceses iban muy por delante de los ingleses en sus investigaciones, pues, tras la prematura muerte de Lebon, Francia quedaría muy rezagada. El alumbrado por gas comenzó en París en 1819, en el Palacio Real, y un cuarto de siglo más tarde no se contaban en la ciudad más de 65.000 quemadores, tanto en el exterior como en el interior de las casas. El éxito de la iluminación de un museo fue la causa de que Baltimore adoptase el alumbrado de gas para sus calles en 1816, seguida por Boston y Nueva York, y en 1837 por Filadelfia, pero el gas no figuró de forma general en las casas americanas hasta después de la Guerra de Secesión. Para entonces el alumbrado de gas se había extendido en mayor o menor medida a las ciudades más importantes de Europa: a Berlín, por medio de una compañía inglesa, en 1826, y en 1866 a una ciudad tan distante

como Moscú. Los aparatos para la fabricación y conducción del gas se convirtieron en una parte importante de las exportaciones de Inglaterra a Europa y Estados Unidos.

Y por lo que respecta a otros usos del gas, las ideas de Lebon inspiraron a un moravio, Z. A. Winzler, quien en diciembre de 1802 dio una cena con alimentos preparados en una cocina de gas y degustados en un comedor calentado también por gas. Pero a mediados de siglo la cocina de gas (fig. 258) era todavía algo muy raro, aunque la utilizaba, por ejemplo, el famoso cocinero Alexis Soyer en el Reform Club de Londres. El hornillo de gas y el calentador, al servicio de necesidades más modestas, fueron puestos en uso en la década de 1860, mientras que en la década de 1870 se hizo rápidamente popular la cocina de gas, con un diseño que apenas cambiaría durante los si-

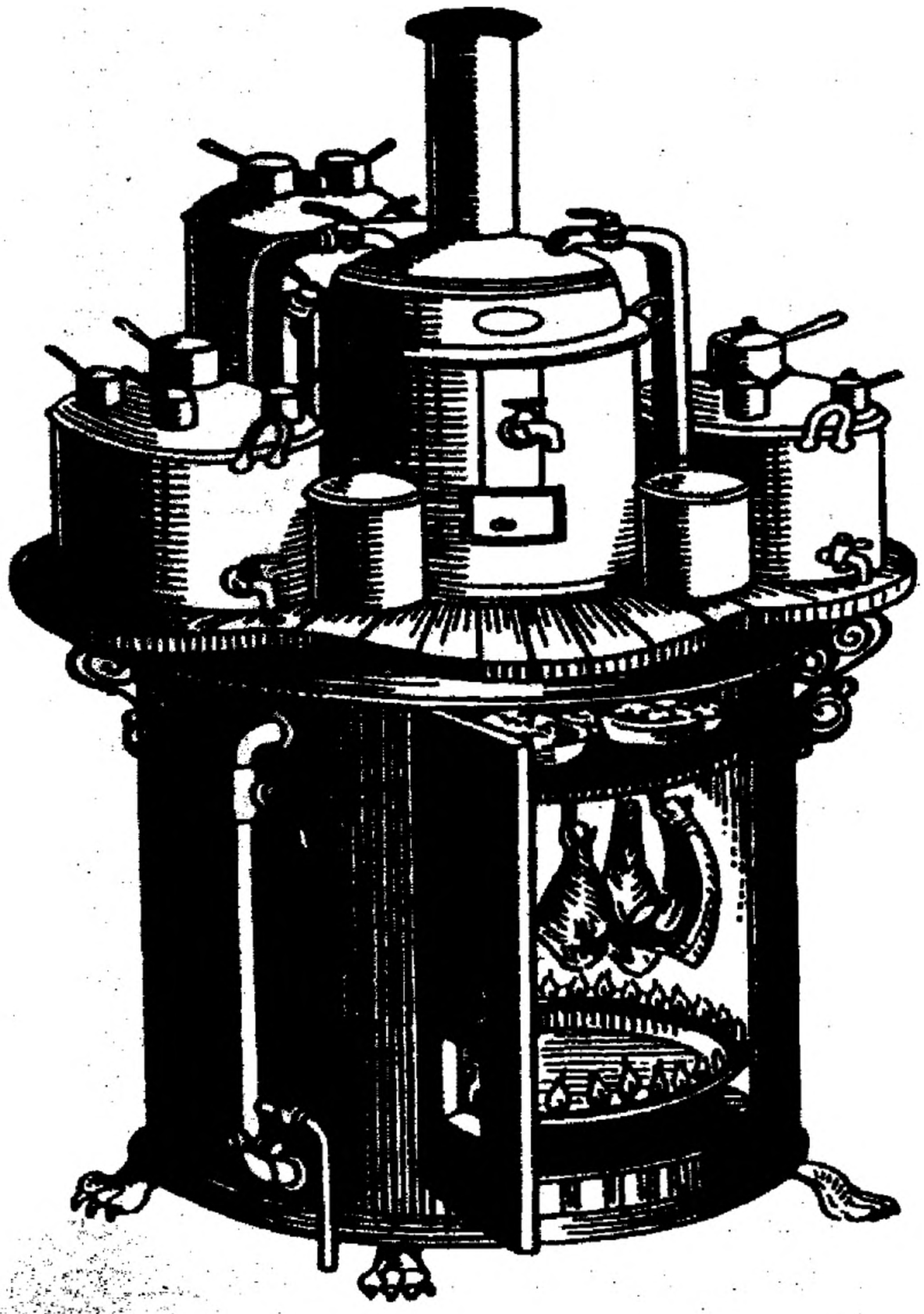


Fig. 258. Cocina de gas destinada a guisar, para cien personas. Alrededor de 1850.

guientes cincuenta años. Sin embargo, la estufa de gas, que en cierto sentido había anticipado ya Winzler, no sería mejorada con la introducción del uso de radiadores hasta 1880, y no gozó de gran popularidad hasta finales de siglo. Para entonces la industria del gas, seriamente amenazada en el campo del alumbrado (como ya hemos visto), se vio forzada a desarrollar con creciente eficacia todas aquellas funciones domésticas e industriales de calefacción que han sido a partir de entonces su principal sostén.

LA PRIMITIVA EXPLOTACION DE YACIMIENTOS BITUMINOSOS

El uso de derivados del petróleo es muy anterior al uso del gas de hulla. Entre el Nilo y el Indo hay al menos treinta sitios donde aparecen yacimientos de petróleo en la misma superficie, siendo estas concentraciones más numerosas en la región mesopotámica. Para los asirios del siglo IX a.C. los escapes de gas marcaban «el sitio donde salía de las rocas la voz de los dioses»; el líquido inflamable, misterioso y sin utilidad práctica a ojos de los antiguos, fue llamado nafta por los babilonios, que quiere decir «la cosa que arde»; y sólo la roca asfáltica sólida y las filtraciones más espesas eran consideradas útiles para la preparación del betún. En los últimos tres milenios a.C. se emplearon con mucha frecuencia distintas mezclas que contenían betún para calafatear barcos, para impermeabilizar techos, e incluso pavimentar calzadas procesionales, para fabricar un mortero sólido con que hacer ladrillos y para medicamentos. Fue un importante objeto de comercio en Mesopotamia, conocido como tal tanto por Estrabón como por Tácito, pero aunque la obtención de petróleo en Mesopotamia tiene una historia que se prolonga hasta nuestros días, no despertó el más mínimo interés en el mundo romano clásico, que tenía todo el betún que necesitaba en forma de alquitrán de

madera o pez, producto que se obtenía muy barato como derivado de la preparación del carbón vegetal. La nafta tenía un uso limitado, pero extremadamente importante en términos militares, como ingrediente del «fuego griego» (p. 388). En consecuencia, los afloramientos de Europa occidental atrajeron poco el interés de las gentes, excepto para su uso como ingrediente en algunas medicinas, pero en los siglos XV y XVI al menos existió un floreciente comercio de petróleo con este propósito (fig. 259).

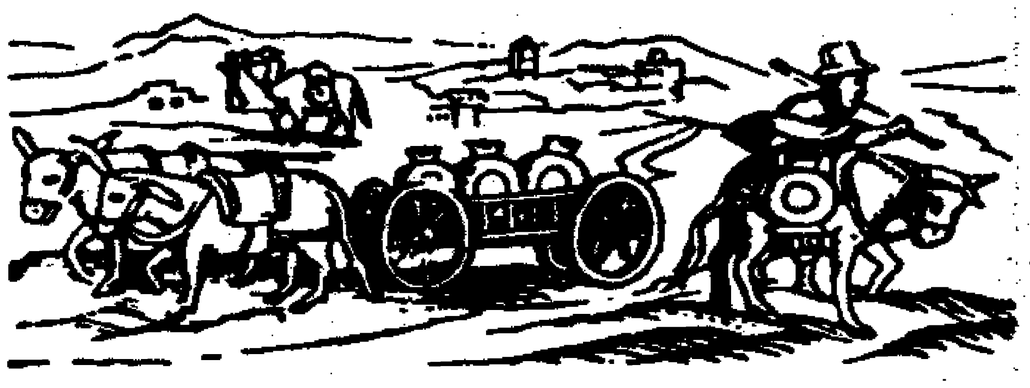


Fig. 259. Transporte de petróleo en barricas. Módena. Alrededor de 1540.

Aunque los gases inflamables y los afloramientos de Bakú habían sido descritos por Marco Polo, despertaron mayor interés los informes procedentes del Nuevo Mundo durante el siglo XVI, relativos a afloramientos en La Habana que se podían utilizar para calafatear barcos, a una materia bituminosa con que los aztecas hacían una especie de goma de mascar, y al lago de asfalto de Trinidad, de 5 km de circunferencia, que visitó Sir Walter Raleigh cuando hizo una incursión a la isla en 1595. En su tratado *De re metallica,* Agrícola describía cómo se recogía el petróleo de los afloramientos, cómo se usaba el calor para espesarlo y cómo se separaba el betún por medio de la fusión de rocas de asfalto; en 1625 el proceso era objeto de un estudio más completo en un pequeño folleto publicado en Estrasburgo. La cuidadosa destilación del crudo mostró que, además de sus usos medicinales, los distintos productos resultantes podían emplearse para engrasar ejes, para fabricar pinturas y barnices, para curtir el cuero y como combustible para lámparas.

Antes de terminar el siglo ya había una patente in-

glesa para tratar la pizarra de piedra arenisca de Pitchford-on-Severn, en Shropshire, cuyo mismo nombre [*pitch* significa pez] demuestra que la presencia de betún era conocida allí desde hacía mucho tiempo. La pizarra era molida en molinos movidos por caballos, y se obtenía cierta cantidad de petróleo por destilación; el residuo era hervido en agua para extraer la pez. Los dos productos principales eran una «trementina» mineral, vendida como medicina, y la pez, que cuando era aligerada con un poco de esa misma trementina daba como resultado un material blando, que no se agrietaba, muy adecuado para calafatear barcos. Con métodos similares se obtenía en Pontypool un barniz negro para cacharros de metal, que era vendido bajo el nombre de «laca de Gales». La época en que florecieron ambas industrias (comienzos del siglo XVIII) fue también importante por el invento de un mástique asfáltico. Ello fue obra de un médico griego, quien en 1712 descubrió rocas asfálticas cerca de Neuchâtel, en Suiza; mezcló las rocas pulverizadas con pez caliente, y utilizó el mástique resultante para hacer suelos y escaleras. El material fue liberado de impuestos en Francia en 1720, y en el transcurso del siglo se encontrarían más yacimientos de roca asfáltica en este país y en otros países europeos. Pero su uso para pavimentos, y luego en las carreteras (p. 634), no se inició hasta después de 1800, y comenzó a ser importante sólo cuando los franceses produjeron en 1832 un mástique de calidad superior por el añadido de aceite mineral.

La moderna industria del petróleo, sin embargo, no tuvo su origen en ninguna de estas fuentes sino en la misma necesidad que condujo al nacimiento de la industria del gas, es decir, la necesidad de mejorar el alumbrado, que creció a finales del siglo XVIII como resultado de la revolución industrial. Las lámparas de que se disponía habían mejorado notablemente de calidad; entre 1783 y 1836 fueron sucesivamente introducidas la mecha de forma aplanada

y el quemador de aceite circular, con mecha cilíndrica y un protector de cristal, conocido por el nombre de su inventor, Argand. Pero la aparición de lámparas de mejor calidad sólo sirvió para poner en evidencia la pobreza de la luz producida con los aceites vegetales y animales al uso. El alumbrado de gas era superior, sin duda alguna, pero la virtual imposibilidad de utilizarlo más que en grandes habitaciones y zonas urbanas sirvió de acicate para buscar una alternativa satisfactoria.

Un material conocido como «petróleo de carbón» fue experimentado por James Young, un antiguo ayudante Faraday, quien en 1848 empezó a tratar el petróleo crudo, que manaba por temporadas de una fuente en una mina de carbón de Derbyshire, para la obtención de lubricantes y otros productos. Young se dedicó a la fabricación de un aceite parafinado por medio de la destilación seca de torbanita, una pizarra marrón, en Bathgate, Lothian, pero las reservas de este material se acabaron. Sin embargo, en 1862 concentró su atención en una materia prima más abundante, y se convirtió en el fundador de la industria escocesa de extracción de petróleo a partir de pizarras, pero antes de esto había aprendido, gracias a las demostraciones llevadas a cabo por un americano dedicado a una fabricación bastante parecida, que la nafta refinada en sus fábricas daba una luz excelente. En consecuencia, a finales de la década de 1850, Young estaba vendiendo en Europa y América «petróleo parafinado para el alumbrado», mientras sus competidores americanos se dedicaban a la fabricación de «petróleo de carbón», extraído de un mineral parecido al asfalto encontrado en New Brunswick.

Mayor importancia tuvo en América, sin embargo, la fabricación de queroseno (de la palabra griega «cera»), nombre que suelen dar los americanos a lo que en Gran Bretaña se conoce como *paraffin*. Tal fabricación sería desarrollada por Abraham Gesner, un médico de Londres aficionado a la geología, cuya

atención quizá se encaminase hacia la industria del petróleo a causa de su amistad con el famoso almirante Cochrane, posteriormente décimo conde de Dundonald, a cuya preocupación por la tecnología, que le había llevado a interesarse tanto por algunas mejoras para la navegación como por la explotación del asfalto de Trinidad, ya hemos hecho referencia (p. 660). Las patentes obtenidas por Gesner se referían a la destilación seca de rocas asfálticas para obtener un líquido que era purificado tratándolo con ácido sulfúrico y cal, y luego vuelto a destilar. El nuevo combustible, el queroseno, se vendió muy bien, junto con una lámpara muy barata, que tenía una mecha plana y un tubo de cristal. Hacia 1856 su inventor creyó que podría desplazar por completo al aceite de ballena, pero tres años más tarde la situación cambiaría por completo al perforarse el primer pozo de petróleo americano.

La perforación de pozos de gran profundidad en la superficie de la tierra no era una novedad, aunque su difusión se viese limitada por la falta de taladros suficientemente potentes, por la falta de energía mecánica para taladrar y por la incertidumbre del resultado. Pero en 1830 la puesta a punto de torres de perforación (p. 715) facilitó tanto la manipulación como el almacenaje de los aparatos de perforación, y alrededor de 1850 se aplicó la máquina de vapor como fuente de energía. A principios del siglo XIX se generalizó la perforación de pozos en busca de agua o sal, y en América, entre 1840 y 1860, por lo menos quince pozos perforados para buscar sal encontraron petróleo: esto llevó al industrial americano G. H. Bissell a considerar la posibilidad de perforar pozos con el deliberado propósito de buscar petróleo. Pero antes de hacerlo envió en 1854 una muestra de petróleo procedente de un afloramiento de Pensilvania, para que lo examinase, a **Benjamin Silliman Jr.**, que acababa de suceder a su padre, catedrático de química inmensamente activo en Yale durante medio siglo. De esta muestra se obtuvieron por destilación diver-

sos productos —aparte del gas para alumbrado, cera parafinada, lubricantes y un excelente combustible para lámparas, que se obtenían con toda facilidad— al calentar el petróleo crudo en un alambique. Bissell, en consecuencia, siguió adelante con sus proyectos, y su contratista Edwin L. Drake, después de perforar 21 m a través de un lecho de rocas, encontró petróleo (27 de agosto de 1859), iniciando así el desarrollo de los yacimientos de petróleo en Pensilvania (fig. 260). Aunque la perforación de pozos de

Fig. 260. El pozo de Drake, tal como aparecía en 1866.

petróleo había empezado en Hannóver, en abril de 1857 y en el mismo año se habían extraído 300 toneladas de dos pozos cavados a mano en Ploesti, Rumania, el hallazgo de petróleo americano, que se produjo en un momento de la historia en que los Estados Unidos estaban preparados para ponerse industrialmente a la cabeza del mundo, ha sido considerado siempre como el punto crítico de la historia del petróleo. En quince años la producción anual, todavía muy concentrada en Pensilvania (fig. 261), había alcanzado los 10 millones de barriles de 165 kg cada uno.

Fig. 261. Pozos de petróleo en Pionner Run, Oil Creek. Alrededor de 1870.

LA INDUSTRIA PETROLIFERA

Norteamérica, con un mercado en rápida expansión de combustible para lámparas, tenía ahora un abastecimiento regular de petróleo crudo del que obtener el producto más importante, el queroseno. Al mismo tiempo, los americanos comenzaron a exportar sus productos, enviándolos en bidones empaquetados en cajas de madera, a los mercados del mundo entero, pero principalmente a Europa, donde el mismo año de los primeros éxitos de Drake montaron una importante exposición de lámparas de parafina en la exposición floral de Gante. En consecuencia, nos encontramos con que los métodos americanos de perforación adquirieron cada vez mayor importancia. El original «sistema de Pensilvania», que imitaba en gran medida las antiguas prácticas chinas recogidas por los misioneros franceses, implicaba el uso de cuerdas de cáñamo para elevar y bajar el taladro. Pero la perforación con chorros de agua y tubos huecos de perforación, a través de los cuales

se bombeaba el agua hasta el extremo del taladro de forma que sirviese para retirar los materiales de desecho, fue una innovación que llegó a la industria del petróleo procedente de Europa, donde se usó por primera vez para perforar un pozo de 168 m cerca de Perpiñán en 1846. Con este método se lograba una velocidad media de perforación de 1 m por hora, que podía ser aumentada utilizando torres de perforación más altas —antes de finales de siglo se alcanzaban los 26 m por hora— y máquinas de vapor más potentes. En 1859 Drake se veía obligado todavía a emplear brocas de hierro forjado con filos de acero, pero al abaratarse el acero colado se hizo gradualmente posible utilizar un material más adecuado. La perforación con diamantes, que podían penetrar a través de formaciones muy duras, fue una invención francesa en la década de 1860, recogida por los americanos y vendida por ellos en Inglaterra, donde sería mejorada por los ingenieros de minas. En 1886 se había alcanzado en una perforación una profundidad de 1.763 m.

Los métodos europeos y americanos de perforación coincidieron especialmente en Galitzia, donde los pozos perforados a mano comenzaron a ser desplazados por sistemas de perforación por percusión hacia 1862, pero las condiciones geológicas no dejaron de plantear serios obstáculos hasta que una firma canadiense introdujo nuevas técnicas, desarrolladas originalmente en Petrolia, Ontario. Algunos expertos de Galitzia se dirigieron a Alemania, donde en 1895 A. Raky inventaba una máquina perforadora rápida, y a los ricos yacimientos rumanos, donde en 1880 había comenzado en Ploesti la perforación mecánica. El acontecimiento europeo de más importancia fue, sin embargo, el desarrollo de la industria en Rusia. Los primeros pozos fueron perforados al norte de Bakú en 1873; fueron contratados técnicos en perforación norteamericanos, que pusieron remate a las torres de extracción, y al cabo de diez años la construcción del ferrocarril Bakú-Batum abrió un merca-

do más amplio que el que se podía alcanzar utilizando como vía de transporte el mar Caspio. Cuando se puso en explotación el pequeño yacimiento de Grozny la producción en Rusia alcanzó la cifra tope durante el período prerrevolucionario de 11.750.000 toneladas (1901), que hizo de ella el mayor productor mundial. Consecuencia de la utilización de una columna hueca, que por medio de la extracción de muestras podía revelar la estructura de las formaciones subterráneas, fue que la cuestión del origen del petróleo adquirió un interés práctico, resultando que las prospecciones dejaron de depender sólo de indicaciones observables en la superficie tan vagas como los afloramientos ocasionales. Pero la apertura de nuevos yacimientos de petróleo en muchas partes del mundo hizo que la composición del petróleo crudo —que podía variar a niveles diferentes, así como en lugares distintos— fuera demasiado variada como para permitir su uso directo. Por lo tanto, los métodos para su refinado adquirieron la máxima importancia, hecho que John D. Rockefeller percibió cuando empezó la organización de la Standard Oil en la década de 1870.

La destilación era ya una práctica habitual en las industrias química y de fermentación alcohólica. Para el petróleo se utilizaban alambiques cilíndricos y horizontales, calentados por vapor de agua (o, posteriormente, por vapor recalentado); el vapor de agua evitaba el peligro de una llama al desnudo. Se separaban tres fracciones en base a sus diferentes puntos de ebullición. La gasolina, que se destilaba la primera, fue considerada durante muchos años no sólo inútil, sino peligrosa; la fracción media proporcionaba el queroseno, que era entonces producto más codiciado, y el residuo con el punto de ebullición más alto era vendido como combustible, sin que se hiciese ningún intento para separar otras fracciones que pudiesen servir como lubricantes. Un despilfarro adicional era ocasionado por el hecho de que había que retirar la tercera fracción y dejar que se enfriase

el alambique entre un proceso de destilación y otro. Este proceso discontinuo fue utilizado en América desde la década de 1850 hasta la de 1880, pero en Europa, con mayor experiencia en la destilación y mayor necesidad de economizar combustible, pronto se puso a punto un sistema continuo.

Ya en 1871 se usaban en Galitzia alambiques dobles, obteniéndose las fracciones más ligeras con alambique superior, y las fracciones más pesadas con alambique inferior, al que fluían los residuos del superior, de forma que la operación era continuada durante tres o cuatro días cada vez. En Bakú la destilación continua se vio en un primer momento obstaculizada por los impuestos que la gravaban, freno al desarrollo tecnológico comparable a las molestias que la industria inglesa había experimentado en sus inicios como consecuencia de los impuestos sobre el cristal y la sal (pp. 876, 775). En 1881 los suecos Ludwig y Robert Nobel, que fueron los grandes adelantados de la industria en Bakú, montaron y patentaron una batería de no menos de diecisiete alambiques; este método se difundió desde el este de Europa al Oriente Lejano, aunque no gozaba de los favores de los americanos que trabajaban allí. Tanto el recalentador de vapor de agua como la destilación al vacío (esta última permitía trabajar con temperaturas menores, y, por lo tanto, disminuía el riesgo de descomposición de las fracciones menos volátiles) fueron usados por primera vez en Europa; a finales del siglo, Rusia, en particular, estaba muy por delante de los Estados Unidos con respecto a la atención que en las universidades se dedicaba a los problemas del refino. Esto fue debido en gran parte a la influencia del ministro de Hacienda, el conde Witte, licenciado por la universidad de Odessa.

El tecnólogo francés G. A. Hirn, que había utilizado vapor recalentado en Logenbach, entonces territorio francés, adaptó el proceso, empleado en la industria del jabón y de las grasas, de refinar ulteriormente las diversas fracciones por medio de métodos quí-

micos. Hacia 1850 introdujo el uso de ácido sulfúrico, eliminando las impurezas con una solución de sosa cáustica. Hacia 1870 se empezó a utilizar (en Budapest) la inyección de aire para asegurar la mejor mezcla del petróleo y las soluciones con que era tratado. Otras posibilidades eran lavarlo con sosa cáustica o filtrarlo a través de capas de ciertas arcillas naturales, que tenían una fuerte acción decolorante, pero excepto en Rusia, el uso de tales arcillas apenas pasaría del estado experimental antes de terminar el siglo. Aproximadamente por esas mismas fechas se empezó a utilizar el proceso llamado *cracking*, consistente en calentar el petróleo a presión para obtener una proporción mayor de los aceites más fluidos, a causa de la ruptura de las largas cadenas de átomos de carbono que forman las moléculas de las fracciones más pesadas y menos volátiles; la primera vez que se utilizó este sistema en los Estados Unidos fue en 1862, siendo su propósito entonces la obtención de una mayor cantidad de combustible para lámparas, en contraste con su uso hoy, que es aumentar la producción de gasolina.

El principal artículo para la industria seguía siendo el queroseno, que alimentaba las lámparas de medio mundo. La competencia del gas en las zonas urbanas y —a partir de 1880— la de su más adaptable rival, la electricidad, hizo que cada vez fuese más urgente encontrar una utilidad para las restantes fracciones. El mismo queroseno había mostrado el camino a seguir con sus amplias posibilidades en la cocina. En la Exposición de París de 1878 se expuso un tipo moderno de cocina de queroseno, y en diez años se vendieron medio millón de ellas. Pero los primeros intentos de utilizar con el mismo propósito los productos más pesados de la destilación, conocidos más tarde como fueloil, no tuvieron éxito. En 1862 se registró una patente americana de un quemador muy primitivo, sencillamente una plancha de metal por la que fluía el aceite pesado en canales paralelos; esta patente fue seguida casi inmediata-

mente por la primera propuesta de quemar no un combustible líquido, sino una neblina producida por medio de la pulverización de aceite caliente con aire comprimido. Este proceso, posteriormente llamado atomización, también podía llevarse a cabo con vapor de agua recalentado, y pronto sirvió para calentar los alambiques de Bakú y los fogones de algunas locomotoras rusas. La atomización mecánica del combustible líquido, último escalón en la evolución de esta idea, aunque patentada en América en 1868, no se hizo totalmente practicable hasta principios del siglo xx. Mientras tanto, en 1865 un artículo en *The Times* señalaba con considerable premonición el gran valor potencial del fueloil para su utilización en los barcos. Se llevaron a cabo diversos experimentos, pero, al menos en Europa, el coste de este producto, comparado con el del carbón, no era un incentivo para el cambio.

Otro uso para las fracciones más pesadas fue la producción de lubricantes, que se habían convertido en un artículo de importancia cada vez mayor a partir de finales del siglo XVIII, a causa de la creciente demanda provocada por los nuevos vehículos y maquinaria. La industria del petróleo a partir de pizarras bituminosas iniciada por Young en Escocia (p. 752) tenía precedentes en Francia y Europa Central, donde había comenzado la fabricación de lubricantes a partir del petróleo un cuarto de siglo antes. Arenas petrolíferas extraídas con agua hirviendo eran la base de un lubricante fabricado en Pechelbronn, y en 1853 se fabricaban en Logenbach lubricantes hechos a base de aceites minerales por medio de la destilación. Los aceites pesados para máquinas se convirtieron en un producto normal de las refinerías de petróleo, y en la década de 1880 ya eran muy utilizados en los ferrocarriles. En Francia se hacía una fabricación especial, a partir de las importaciones de petróleo crudo americano: un aceite muy fino para husos con el que se preparaban las fibras textiles antes de ser hiladas.

Sin embargo, la gasolina seguía siendo considerada por lo general como un derivado industrial sin valor y peligrosamente inflamable, cuyo campo de utilización más prometedor parecía ser el de los sopletes de soldador y las cocinas a presión, mientras que los hidrocarburos mixtos de queroseno conocidos bajo el nombre de nafta encontraban una aplicación limitada en la limpieza en seco y en la extracción de aceite vegetal. Lo viejo y lo nuevo se dieron cita, no obstante, en un proyecto para combinar el gas de hulla con gasolina, siendo concretamente el método utilizado el mezclar vapor de gasolina con el gas. Pero el gasoil (extraído de la fracción intermedia entre el queroseno y los lubricantes), que era más barato y menos peligroso que la gasolina, podía ser desintegrado a alta temperatura para proporcionar un medio más adecuado de enriquecer el gas de hulla, y en los Estados Unidos era incluso posible usar gas natural para este mismo propósito. Y por lo que respecta al motor de combustión interna, el motor Diesel, y el motor de gasolina (cap. 21), estas maravillas de la capacidad inventiva del siglo XIX tuvieron un efecto muy limitado sobre la industria del petróleo durante el período que ahora estamos considerando. Habrían de pasar cuarenta años (1860-1900) antes de que la producción anual de petróleo crudo en los Estados Unidos alcanzase los 9.250.000 toneladas, cifra que sería cuadruplicada en 1914 y de nuevo en 1929.

La demanda de productos derivados del petróleo, relativamente pequeña durante la época anterior a la aparición del automóvil de Ford, se ve reflejada en el carácter primitivo de la organización montada para su transporte. Para empezar, en Pensilvania se utilizaron barriles de madera (fig. 262) en los que se llegaron a transportar cargamentos a través del Atlántico; luego llegarían las latas y los bidones de hierro laminado, y los tanques de hierro o cemento como contrapartida en las bodegas de los barcos. Los buques cisterna de vapor fueron desarrollándose

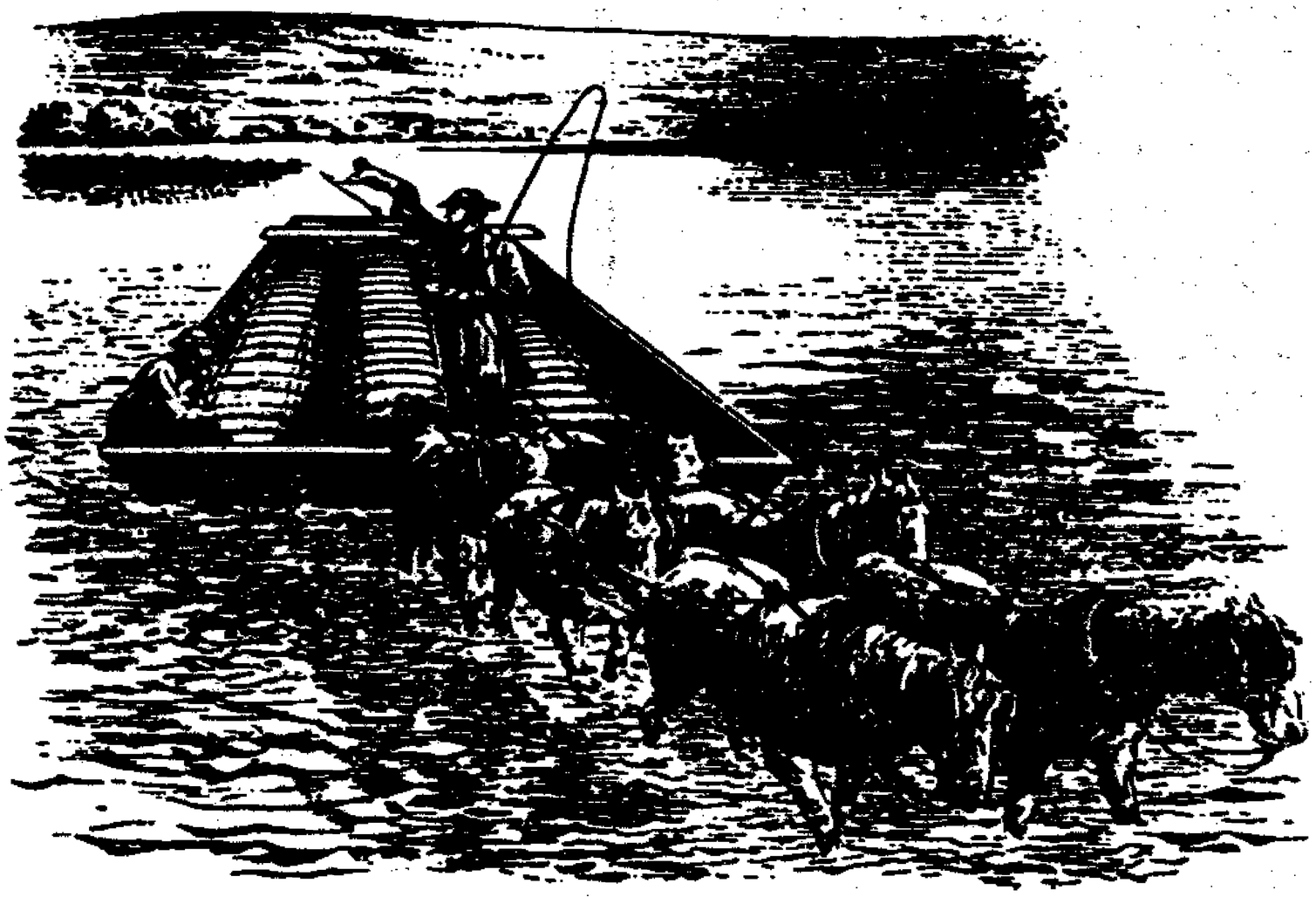


Fig. 262. Transporte fluvial de petróleo, Oil Creek, Pensilvania, 1875.

poco a poco (p. 546), pero el primero entró en servicio en el mar Caspio en 1879 y el primer ejemplar transoceánico hizo su primera travesía de Batum a Londres en 1885; ambos fueron construidos para los Nobel en Suecia. En la década de 1870 se construyeron oleoductos de acero tanto en América como en Rusia; en 1880 ya era un rasgo característico del monopolio de la Standard Oil en América el hecho de que «posee y controla los oleoductos de las regiones productoras unidas con los ferrocarriles», como señalaba A. P. Hepburn.

LA PRIMITIVA MANUFACTURA DEL CAUCHO

La historia del caucho se parece a la del petróleo en que aquel material fue utilizado por primera vez fuera del área de la civilización europea; en que su uso se desarrolló rápidamente a lo largo del siglo XIX, y en que, sin embargo, hasta el siglo XX, no llegó a ocupar su sitio como materia prima de básica importancia, sin la que el transporte moderno en

particular no podría subsistir. En lo que respecta a las diferencias, una de las más importantes estriba en el hecho de que el caucho es esencialmente un producto tropical, mientras que el petróleo es un yacimiento natural que se puede encontrar en cualquier clima. Otra diferencia estriba en la relativa simplicidad tanto de la preparación del caucho como de su adaptación para fines tecnológicos.

La propiedad característica del caucho es la de recuperar su forma después de haber sufrido una deformación, cualidad que los nativos de la América central y del sur conocían perfectamente mucho antes de la llegada de los conquistadores españoles. Cortaban la corteza de la planta y recogían el látex líquido que rezumaba lentamente: este látex es una emulsión lechosa de caucho en una solución acuosa. Se puede hacer que el caucho coagule y se separe del agua calentando la solución: los nativos de Brasil lograban esto introduciendo repetidamente una paleta de madera en el látex y sometiéndola a la acción de un fuego de madera, de forma que la paleta se iba cubriendo gradualmente de una espesa capa de caucho, que entonces se retiraba. En el siglo XIII eran de uso común entre los mayas y los aztecas los artículos de caucho, entre los que se incluían pelotas de juego; la forma deseada se obtenía llevando a cabo la coagulación en moldes hechos de arcilla o de otro material.

Puesto que los españoles conocían desde los días de Cortés y Pizarro tanto la industria como las diversiones de los pueblos que habían conquistado, y puesto que en 1615 a más tardar usaban ya ellos mismos el caucho para hacer impermeables sus capotes militares, parece que demuestra una notable ineptitud nacional el hecho de que se dejase a los franceses, más de un siglo más tarde, que llevasen a cabo el estudio y la introducción del uso del caucho en Europa. Charles de la Condamine, que había sido enviado por la Academia Francesa de Ciencias en una expedición a Perú, trajo de vuelta el *caoutchouc*,

nombre que recibió entonces, y en 1751, quince años después de la expedición, rindió un informe a la Academia, acompañado de la memoria redactada por otro francés, Fresneau. Una de sus primeras aplicaciones dio al caucho su nombre inglés (*rubber*): Joseph Priestley se dio cuenta, en 1770, de la utilidad del caucho para borrar (*for rubbing*) las señales de lápiz. Fresneau había fabricado varios objetos elásticos con látex recién recogido, pero señaló las dificultades que planteaba la rápida coagulación del látex, de forma que, a falta de algún sistema para remodelar el caucho, sólo se podían fabricar objetos sobre el terreno. En consecuencia, el caucho que entonces comenzaba a importarse a Europa consistía sólo en grandes bolas de fabricación nativa, y aunque los químicos franceses pronto sugirieron el uso de trementina o éter como disolventes para devolver al caucho su primitivo estado líquido, el valor del nuevo material estaba claramente limitado por la dificultad de trabajarlo.

En Francia, en tiempos de la Revolución, un procedimiento muy primitivo que consistía en ir enrollando tiras de caucho ablandado con aceite alrededor de una barra e irles aplicando un vendaje hasta que adquiría la forma deseada, servía para producir tubos que sin duda alguna eran muy caros pero que encontraron muy buena acogida entre los cirujanos, como la encontraron los vendajes elásticos y otras aplicaciones similares. En Inglaterra, durante el mismo período, se llevaron a cabo algunos trabajos experimentales en productos impermeables y se registró una patente de un colchón neumático. En 1783 se utilizó un tejido cauchotado para la fabricación de un globo, y a principios del siglo XIX una combinación de caucho y tejido servía para la fabricación de ligas y objetos similares. Sin embargo, no se obtuvieron resultados demasiado sorprendentes hasta que Thomas Hancock se interesó en el asunto; sus patentes fueron uno de los factores más impor-

tantes en el desarrollo de esta industria desde 1820 hasta que aquéllas expiraron en 1858.

Insatisfecho con la práctica habitual de utilizar trementina como disolvente, lo que producía soluciones muy débiles que se secaban con gran dificultad, la primera idea de Hancock fue usar el caucho directamente para fabricar (empleando sus propias palabras) «un tipo de material elástico mejor que ninguno de los que entonces estaban en uso». Cortaba tiras o anillos de las bolas de caucho importadas y los combinaba con cuero o algodón para que actuara como material elástico en guantes, tirantes, botas y zapatos cerrados, y para dar elasticidad a las suelas de los zapatos. Pero según aumentaban los negocios, Hancock empezó a encontrar dificultades para la importación de bolas de caucho en cantidad suficiente y del tamaño adecuado para sus fines, y su sistema de cortar las bolas de caucho obligaba a hacer frente a un desperdicio antieconómico del mismo. Por lo tanto empezó a hacer experimentos con una máquina trituradora, diseñada para convertir los restos de caucho en pequeños trozos dentro de un cilindro hueco provisto de dientes giratorios. Pero el resultado inesperado de su sistema no fue producir trocitos de caucho, sino una masa homogénea de caucho sólido. En una versión aumentada, y con los dientes acoplados a un rodillo macizo dentro del cilindro hueco, este aparato se transformó en el masticador (fig. 263) con el que se podían fabricar con toda facilidad cilindros de caucho. Los cilindros podían ser sometidos entonces a compresión en moldes de hierro para obtener bloques de cualquier forma o tamaño deseados.

Tras este descubrimiento básico realizado en 1820, Hancock procedió a la fabricación de planchas de caucho cortando sucesivas capas de un bloque. El tamaño final de las planchas fabricadas era ilimitado, puesto que las piezas podían ser unidas borde con borde calentándolas; también podían ser cortadas en hilos, aunque éstos no eran tan fuertes como

los fabricados directamente a partir del caucho nativo. Con el caucho en bolas se obtenían hilos de sólo unos 13 centímetros de longitud, limitada por el tamaño de la bola original, pero estas piezas pequeñas podían ser calentadas y unidas posteriormente por sus extremos. Para fabricar hilos con menos junturas, Hancock se entendió con los nativos de Sudamérica para que le enviasen caucho curado en forma de tubos, que él cortaba en espiral con un torno. Este hilo fue utilizado como urdimbre en tejidos elásticos y correas.

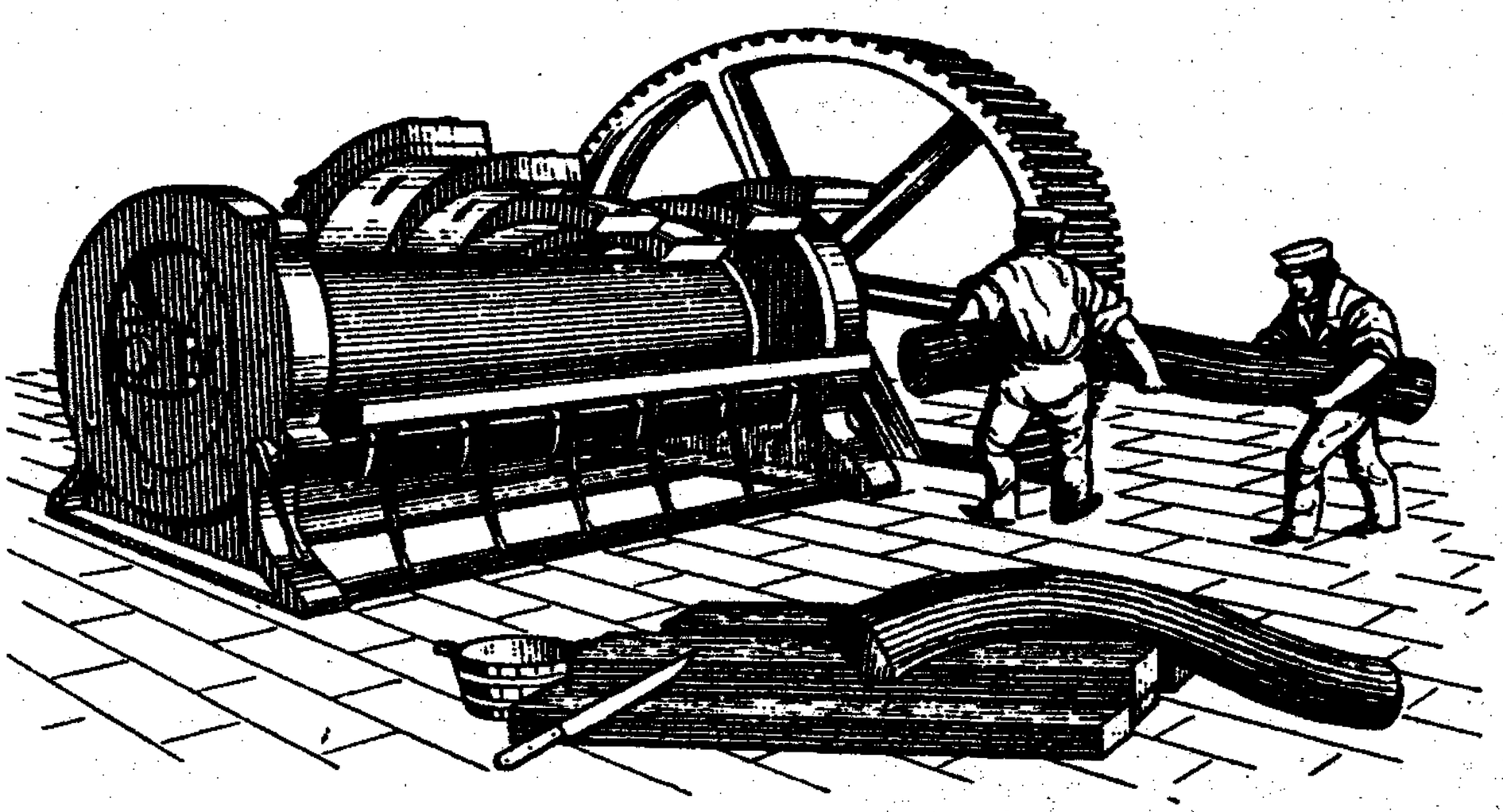


Fig. 263. Gran masticador de caucho.

Hasta entonces sólo se había utilizado caucho puro: el siguiente paso de importancia consistió en mezclar caucho con otras sustancias. Hancock descubrió que era posible mezclar en el masticador pez con el caucho, logrando así un producto más barato, pero pronto se generalizaría el uso de una máquina mezcladora abierta de dos rodillos (fig. 264), rodillos que podían calentarse si era necesario y que giraban en direcciones opuestas y a diferente velocidad. Se producía así una acción desgarradora, que al final concentraba todo el caucho en una lámina

continua en el rodillo frontal. En ese momento tenía una consistencia similar a la de la masa de harina, y entonces se le podían añadir nuevos ingredientes. Para lograr que la calidad fuese lo más uniforme posible antes de continuar el proceso, la lámina era cortada y doblada muchas veces. Este fue el tipo normal de mezcladora hasta finales de siglo.

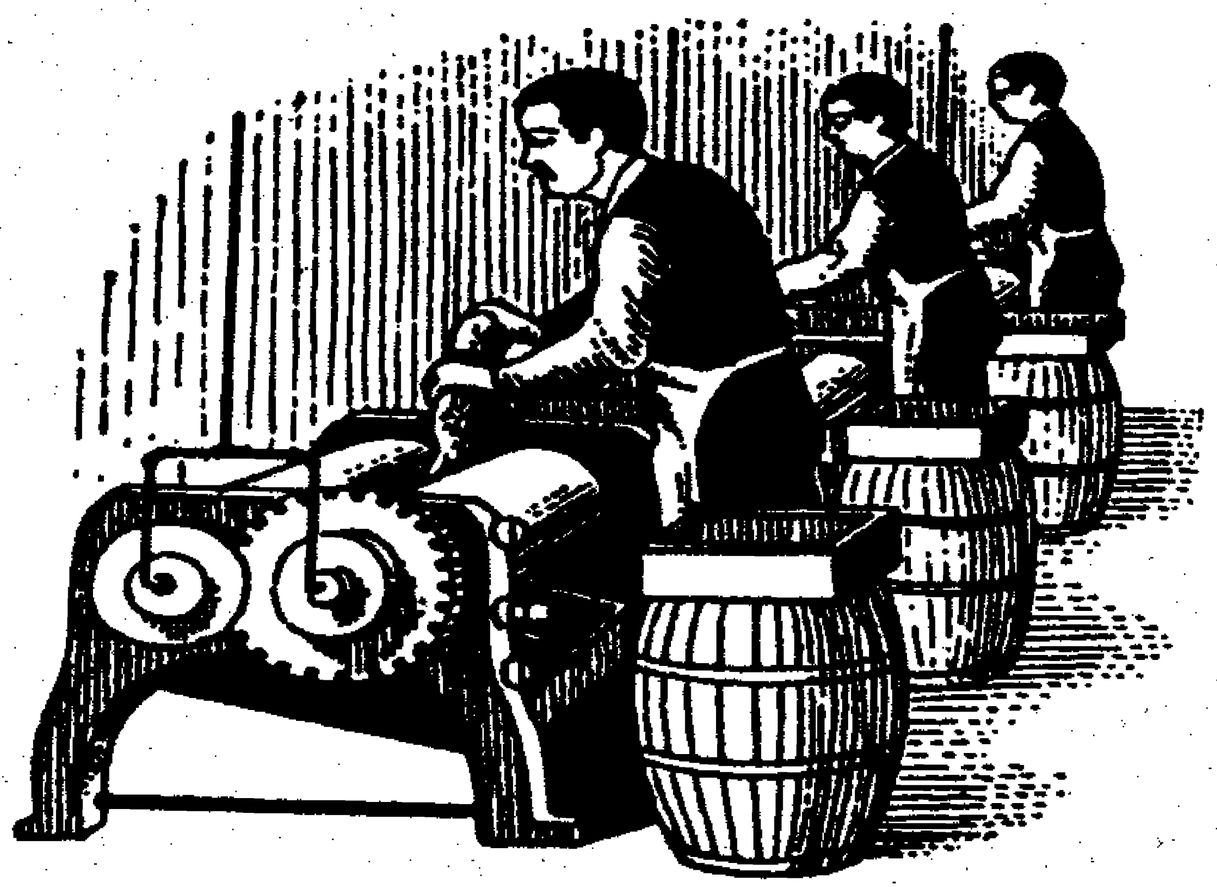


Fig. 264. Máquina mezcladora de caucho, con toneles para calentamiento por vapor.

Otro importante iniciador fue Charles Macintosh, fabricante de productos químicos de Glasgow, quien descubrió que la nafta obtenida del alquitrán de hulla y producida en la industria del gas, entonces en rápida expansión, era un disolvente eficaz del caucho. Con tiras de bolas de caucho disueltas en nafta preparó un barniz que se podía aplicar sobre una tela, donde el caucho formaba una capa viscosa e impermeable al aire y al agua después de evaporarse la nafta: si se comprimían dos piezas de tela semejantes con el caucho en medio se obtenía un tejido compuesto muy útil que no tenía ninguna superficie pegajosa. La primera fábrica para la producción de los impermeables conocidos como *mackintosh* fue abierta en Manchester en 1824. Hancock logró que el procedimiento descubierto por Macintosh fuese más económico gracias al uso del caucho masticado, y, posteriormente, en colaboración con Macintosh, inventó una máquina untadora, de

un tipo que todavía se sigue utilizando hoy, con la que se podían tratar grandes superficies de tela a gran velocidad. En 1836, un año antes de la introducción de la máquina untadora para la fabricación de tejido impermeabilizado, un inventor americano, E. M. Chaffee, logró un resultado semejante acelerando la preparación del caucho en forma de planchas. Su calandria comprimía el caucho en planchas entre rodillos calentados interiormente y hechos de acero muy pesado, después de lo cual era introducido entre dos envolturas de forma que las planchas no se pegasen entre sí dado el estado en que se hallaban, calientes y blandas. Una calandria fabricada según un diseño americano en 1849 todavía se sigue usando en Bradford-on-Avon, Wiltshire.

A principios del reinado de la reina Victoria la manufactura del caucho estaba ya muy desarrollada, al menos en Inglaterra: durante el período 1830-40 las importaciones de caucho bruto aumentaron desde 23 a 332 toneladas. Aparte de prendas impermeables y zapatos de caucho, este material estaba empezando a ser utilizado regularmente en gran número de los más variados instrumentos usados en ingeniería, y se seguía utilizando en cirugía para una gran variedad de propósitos. Los métodos perfeccionados de Hancock habían sido introducidos por él mismo en Francia en 1828. También en América se había producido un rápido desarrollo en la manufactura del caucho a partir de 1830 aproximadamente, sobre todo para la producción de zapatos de caucho. Pero allí la práctica inglesa de colocar el caucho en medio del tejido, como en los tejidos impermeables y elásticos, no gozaría de gran aceptación; por el contrario, se hacía mayor uso del caucho bruto o de caucho protegido solamente por uno de sus lados con un tejido. En 1835 el rigor del clima sería causa de que los productos de caucho ganasen muy mala fama ya que perdían su elasticidad con el frío y se ponían blandos y pegajosos con el calor; aunque los americanos, como veremos, reaccionaron con fuerza al

desafío impuesto por las condiciones adversas, la posición de la industria fue allí durante muchos años más precaria que en Inglaterra.

LA VULCANIZACION Y LA AMPLIACION DE LOS USOS DEL CAUCHO

Charles Goodyear, un ferretero de Filadelfia que se había interesado por los problemas planteados por la manufactura del caucho, llevó a cabo una larga serie de experimentos con objeto de tratar de aumentar la capacidad del material para soportar temperaturas extremas. En una ocasión recalentó por casualidad una mezcla de caucho, azufre y albayalde, y descubrió que, aunque estaba carbonizada en el centro, los bordes estaban perfectamente vulcanizados; a la sustancia resultante le afectaba relativamente poco el frío o el calor, y no se podía disolver como el caucho original. En 1841 Goodyear estaba en condiciones de producir el nuevo material en planchas continuas de calidad uniforme, haciendo pasar la mezcla a través de un canal calentado de hierro colado, y en diciembre depositaba una descripción detallada del sistema en la Oficina de Patentes de los Estados Unidos. Ello no era en sí mismo una solicitud de patente, y por razones financieras no se solicitó una patente inglesa hasta tres años más tarde. Puesto que había un fuerte prejuicio en contra del caucho en América, Goodyear trató de vender su secreto a Macintosh, quien estaba interesado en encontrar un procedimiento para producir prendas de un tejido simple y recubierto de una capa de caucho que no se pusiese pegajoso ni se agrietase. La firma inglesa se negó a comprar un procedimiento que no había sido patentado, pero se le dieron a Hancock algunas muestras del producto conseguido por Goodyear, y aquél procedió por su cuenta a conseguir a fuerza de trabajo el método empleado en su fabricación; obtuvo una patente en Inglaterra en

noviembre de 1843, un par de meses antes de que Goodyear solicitase la suya. Goodyear le había enseñado, por lo menos, que el problema tenía una solución.

La vulcanización, como su nombre indica, es en líneas generales un proceso de calentamiento. Se añadía azufre al caucho, junto con otros ingredientes de menos importancia, y se elevaba la temperatura en la máquina mezcladora hasta que se lograba una mezcla completa de los distintos componentes. El proceso se completaba calentando el caucho, tratado con azufre, en los moldes en que tenían que modelarse los productos finales. La vulcanización eliminó la mayoría de los problemas asociados al uso del caucho, variando el límite en que cambiaban sus propiedades según la cantidad de azufre empleado y según la temperatura y duración del proceso. En 1846 Alexander Parkes inventó un nuevo proceso de vulcanización: según este método, sólo apropiado para la obtención de planchas muy finas de caucho y objetos de muy poco espesor, se sumergía el caucho en una solución débil de cloruro de azufre.

Al extinguirse la patente de Hancock en 1858, el éxito del caucho vulcanizado estaba asegurado. Las pesadas prendas impermeables podían ser sustituidas ahora por otras más ligeras; había una creciente demanda de botas de caucho y de otros tipos de calzado, y se solicitaba caucho en la industria de ingeniería para válvulas, correas transportadoras y diversos tipos de tubos flexibles. Como consecuencia, la importación de caucho aumentó en Inglaterra en cerca de un 400 por 100 a partir de 1840, y se aproximaba rápidamente el día en que el único caucho no vulcanizado sería el utilizado para adhesivos, gomas de borrar o usos tan específicos como las suelas de crepé en el calzado.

El aumento en la utilización del caucho experimentado durante el siglo XIX —Brasil, que era el principal proveedor de materia prima, aumentó su producción de 31 toneladas en 1827 a 27.650 en

1900— está íntimamente relacionado con el desarrollo de los sistemas de transporte. En la era anterior al ferrocarril tenía un valor especial para equipar a los viajeros al descubierto con prendas exteriores impermeables, incluyendo el calzado, mientras que en la era del ferrocarril su empleo contribuyó en gran medida a aumentar la comodidad de los viajes reduciendo el traqueteo. Ya en 1826 había una patente para usar bloques cúbicos de caucho para reemplazar los muelles de acero en los vehículos de carretera, y en 1845 se utilizaba el caucho como amortiguador en los topes de los vagones de ferrocarril; los resortes de taco de caucho hicieron su aparición en 1852. Pero incluso antes de mediado el siglo Hancock había iniciado ya la manufactura de llantas de caucho para vehículos de carretera, en la que cien años más tarde se emplearía mucho más caucho que en todos los demás usos juntos. Las primeras llantas para vehículos de carretera fabricadas por Hancock en 1846 eran macizas, de cerca de 38 milímetros de anchura y de 32 milímetros de espesor e iban unidas a un aro de metal o metidas a presión sobre la rueda y sostenidas en su sitio por medio de unos rebordes. Pero en la misma década de 1840 se registró una patente para llantas neumáticas de caucho con una funda externa de cuero: estas «ruedas aéreas», como fueron llamadas, se probaron en Hyde Park y rodaron con éxito más de 1.900 kilómetros; llegarían a extenderse hasta Nueva York y, sin embargo, pronto caerían en el más completo olvido. Reaparecieron en 1888 como una mejora de las llantas de caucho macizas que a partir de 1870 habían sido muy utilizadas para bicicletas, y el éxito inmediato de las llantas neumáticas para bicicleta de Dunlop llevó a realizar experimentos con un mayor número de capas de lona y una banda de rodamiento más gruesa para su uso en los nuevos vehículos a motor. El primer neumático de Michelin para automóvil apareció en 1895; los de Dunlop, en 1900, y con la creciente popularidad del automóvil se hicie-

ron grandes fortunas con la producción de compuestos de caucho cada vez de mayor duración con destino a la industria del mismo.

Otra aplicación muy importante del caucho en el siglo XIX estuvo en la industria eléctrica, especialmente en el aislamiento de cables (p. 911). Por esta razón cada vez se concedió más importancia a la mejora de los métodos de extrusión, para lo que se registraron patentes ya en 1845. El método finalmente adoptado fue el de llevar el caucho hasta el extremo de un cilindro por medio de un eje y un émbolo movidos mecánicamente y muy ajustados a los bordes del cilindro. Desde el extremo de éste se hacía que el caucho rodease el alambre haciéndolo pasar a través de un troquel caliente que le daba la forma deseada.

LA PLANTACION DE CAUCHO

Todo esto presuponía la existencia de un abastecimiento casi sin límites de la materia prima —Inglaterra, por ejemplo, en 1900 importaba 20.000 toneladas anuales— como en el caso del petróleo y del gas de hulla. El látex del caucho, sin embargo, era un líquido de cualidades bastante variables, procedente de la corteza de unas plantas tropicales, y el procedimiento de sangrar los árboles para conseguir el caucho estaba en la práctica confinado a América del sur y central. Puesto que la producción de caucho sintético todavía quedaba en un futuro lejano, ha de concederse mucha importancia a las dos etapas a través de las cuales nacieron las plantaciones de caucho que en el siglo XX abastecieron el mercado.

La idea de cultivar expresamente plantas de caucho en las Indias Orientales y Occidentales data de fecha tan lejana como 1855, pero hasta 1873 el India Office, que había ya establecido que las mejores plantas de caucho eran las *hevea* de Sudamérica, no procuraría las semillas para crear seis viveros cuyas

plantas serían enviadas a Calcuta, donde no prendieron. Se hizo un segundo intento con plantas de vivero enviadas desde Brasil, de las que apenas sobrevivieron unas treinta; se distribuyeron esquejes de estas plantas entre Ceilán, Singapur y Java. Finalmente se solicitaron los servicios de un plantador inglés residente en el Amazonas para la recolección de semillas de árboles en explotación. Fueron rápidamente enviadas por barco a los viveros de Kew Gardens y sembradas al día siguiente de su llegada, con el resultado de que cerca de 2.000 plantas serían enviadas a Ceilán en agosto de 1877 (fig. 265) para expedirlas desde allí a Singapur y a otros lugares. Al final del siglo los servicios oficiales estaban distribuyendo plantas y semillas por millones todo a lo largo de una ancha zona del Oriente Lejano y en la Guayana inglesa, Honduras y las Indias Occidentales. El coste total de la aventura inicial, sin embargo, sólo había sido de 1.500 libras.

A pesar de todo, las plantaciones no lograrían una efectiva producción hasta 1895. Roturar y preparar los terrenos, plantar y cultivar, todo esto llevaba

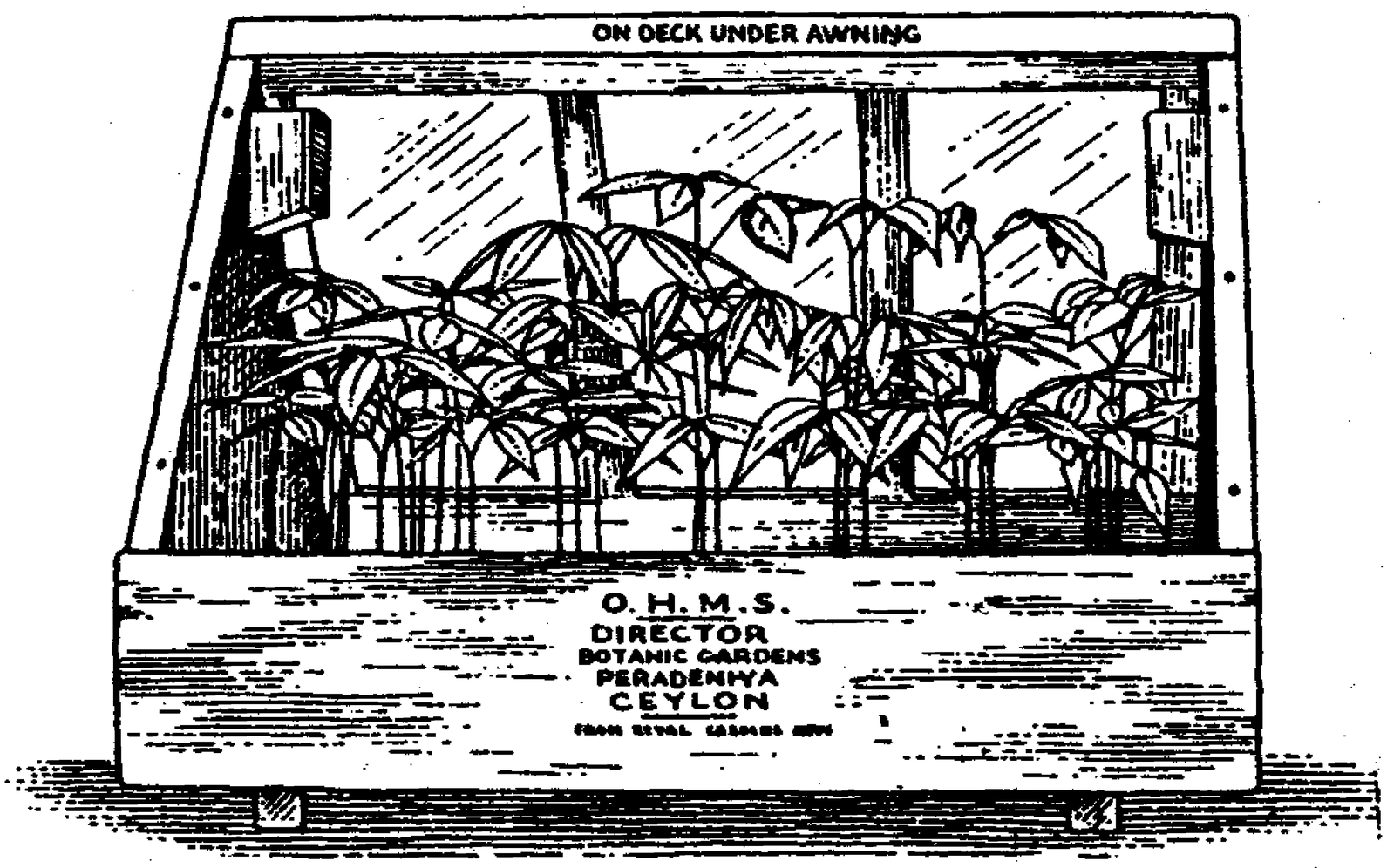


Fig. 265. Caja en la que fueron enviadas desde Kew las plantas de caucho para iniciar la industria de plantaciones del mismo en Oriente.

tiempo; y a ello había que sumar la formación del personal y el estudio de los mejores sistemas para sangrar los árboles. Esto llevó, aproximadamente en 1889, a reemplazar el método de los nativos de cortar la corteza por un nuevo sistema en que se hacía una incisión preliminar que luego se volvía a abrir a intervalos de tiempo, de forma que se lograse el máximo de látex con un mínimo de daño para el árbol. Se hicieron además considerables adelantos en los métodos de coagulación del látex y de preparación del caucho para el mercado.